



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PRÓTESIS ERGONÓMICA  
DE ANTEBRAZO Y MANO DERECHA POR MEDIO DE  
TECNOLOGÍAS DE ESCANEEO 3D, MODELADO CAD E IMPRESIÓN  
3D”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Propuesta tecnológica

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO INDUSTRIAL**

**AUTOR: OMAR DAVID ESTRADA APOLO**

**DIRECTOR: Ing. JHONNY MARCELO OROZCO RAMOS**

Riobamba–Ecuador

2020

**©2020, Omar David Estrada Apolo**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando el Derecho de Autor.

Yo, **Omar David Estrada Apolo**, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados de este son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académicas de los contenidos se esté trajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 13 de marzo de 2020

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Omar David Estrada Apolo', with a long horizontal line extending from the end of the signature.

*Omar David Estrada Apolo*

120606799-1

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

El tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Propuesta tecnológica, **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PRÓTESIS ERGONÓMICA DE ANTEBRAZO Y MANO DERECHA POR MEDIO DE TECNOLOGÍAS DE ESCANEEO 3D, MODELADO CAD E IMPRESIÓN 3D”**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

**FIRMA**

**FECHA**

Ing. Marcelo Antonio Jácome Valdez.

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

Ing. Jhonny Marcelo Orozco Ramos

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Ing. Eduardo Francisco García Cabezas

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación se lo dedico a mi familia como retribución al amor y al apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida, lo cual, constituyó el motor que me impulsó a lograr este objetivo.

**Omar.**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco de forma especial a mi familia ya que sin su apoyo este sueño no se hubiese cristalizado. Todo lo que soy y todo lo que he logrado se lo debo a ustedes, muchas gracias.

Agradezco a todos mis amigos, compañeros y docentes que conocí a lo largo de mi carrera estudiantil y que han constituido un pilar fundamental para mi desarrollo profesional.

**Omar.**

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiv
RESUMEN.....	xv
SUMMARY/ABSTRACT .....	xvi

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Antecedentes .....	1
1.2	Planteamiento del problema.....	1
1.3	Justificación .....	2
1.4	Objetivos .....	3
1.4.1	<i>Objetivo general</i> .....	3
1.4.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	3
2	MARCO TEÓRICO .....	4
2.1	Estado del arte.....	4
2.2	Bases teóricas.....	5
2.2.1	<i>Personas con capacidades especiales</i> .....	5
2.2.2	<i>Amputación transradial</i> .....	5
2.2.3	<i>Antebrazo y mano</i> .....	5
2.2.4	<i>Antropometría</i> .....	6
2.2.5	<i>Ergonomía</i> .....	7
2.2.6	<i>Prótesis</i> .....	7
2.2.7	<i>Escaneo 3D</i> .....	8
2.2.8	<i>Modelado CAD</i> .....	8
2.2.9	<i>Impresión 3D</i> .....	8
2.3	Marco legal .....	9

<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>DISEÑO DE LA PRÓTESIS .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1.1</b>	<b><i>Parámetros de diseño y construcción .....</i></b>	<b><i>10</i></b>
<b>3.1.2</b>	<b><i>Hoja de datos del paciente .....</i></b>	<b><i>11</i></b>
<b>3.1.3</b>	<b><i>Análisis antropométrico .....</i></b>	<b><i>12</i></b>
<b>3.1.4</b>	<b><i>Escaneado del muñón .....</i></b>	<b><i>15</i></b>
<b>3.1.4.1</b>	<b><i>Go!scan 50 .....</i></b>	<b><i>15</i></b>
<b>3.1.4.2</b>	<b><i>VXelements .....</i></b>	<b><i>16</i></b>
<b>3.1.4.3</b>	<b><i>Proceso de escaneado .....</i></b>	<b><i>17</i></b>
<b>3.1.5</b>	<b><i>Selección de material para impresión .....</i></b>	<b><i>25</i></b>
<b>3.1.6</b>	<b><i>Selección del hilo conductor .....</i></b>	<b><i>27</i></b>
<b>3.1.7</b>	<b><i>Modelado CAD de la prótesis ergonómica. ....</i></b>	<b><i>29</i></b>
<b>3.1.7.1</b>	<b><i>Componentes de la prótesis .....</i></b>	<b><i>29</i></b>
<b>3.1.7.2</b>	<b><i>Modelado CAD de la mano .....</i></b>	<b><i>30</i></b>
<b>3.1.7.3</b>	<b><i>Modelado CAD del antebrazo .....</i></b>	<b><i>38</i></b>
<b>3.1.7.4</b>	<b><i>Modelado CAD del acople .....</i></b>	<b><i>40</i></b>
<b>3.1.8</b>	<b><i>Análisis estático .....</i></b>	<b><i>41</i></b>
<b>3.1.8.1</b>	<b><i>Creación del material PLA en Solidworks .....</i></b>	<b><i>42</i></b>
<b>3.1.8.2</b>	<b><i>Análisis Estático – Pasadores .....</i></b>	<b><i>44</i></b>
<b>3.1.8.3</b>	<b><i>Análisis Estático – Acople antebrazo .....</i></b>	<b><i>48</i></b>
<b>3.2</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DE LA PRÓTESIS .....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Impresora 3D .....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Proceso de impresión 3D .....</b>	<b>54</b>
<b>3.2.2.1</b>	<b><i>Configuración de la impresora .....</i></b>	<b><i>54</i></b>
<b>3.2.2.2</b>	<b><i>Impresión de los componentes .....</i></b>	<b><i>57</i></b>
<b>3.2.2.3</b>	<b><i>Grados de libertad .....</i></b>	<b><i>66</i></b>
<b>3.2.2.4</b>	<b><i>Pruebas de funcionamiento .....</i></b>	<b><i>69</i></b>
<b>3.2.2.5</b>	<b><i>Prótesis masculina .....</i></b>	<b><i>71</i></b>
<b>4</b>	<b>GESTIÓN DEL PROYECTO .....</b>	<b>72</b>
<b>4.1</b>	<b>Tiempos de impresión .....</b>	<b>72</b>
<b>4.2</b>	<b>Costos de impresión .....</b>	<b>73</b>
<b>4.3</b>	<b>Cronograma .....</b>	<b>74</b>



<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>76</b>

**BIBLIOGRAFÍA**

**ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2</b> Movimientos articulares .....	6
<b>Tabla 2-2</b> Clasificación de prótesis según su nivel de amputación .....	8
<b>Tabla 3-2</b> Materiales para la impresión 3D .....	9
<b>Tabla 1-3.</b> Hoja de datos del paciente .....	12
<b>Tabla 2-3.</b> Análisis antropométrico.....	13
<b>Tabla 3-3.</b> Análisis antropométrico de la mano .....	14
<b>Tabla 4-3.</b> Especificaciones del scanner Go!scan 50 .....	15
<b>Tabla 5-3.</b> Parámetros de escaneado .....	20
<b>Tabla 6-3.</b> Distancia de escaneo.....	22
<b>Tabla 7-3.</b> Alternativas de selección, material de impresión .....	25
<b>Tabla 8-3.</b> Evaluación de alternativas, material de impresión .....	26
<b>Tabla 9-3.</b> Alternativas de selección, hilo conductor .....	27
<b>Tabla 10-3.</b> Evaluación de alternativas, hilo conductor .....	28
<b>Tabla 11-3.</b> Modelo CAD de la falange .....	30
<b>Tabla 12-3.</b> Diseño de las falanges.....	34
<b>Tabla 13-3.</b> Diseño de la palma de la mano .....	37
<b>Tabla 14-3.</b> Diseño del antebrazo.....	39
<b>Tabla 15-3.</b> Diseño del acople.....	40
<b>Tabla 16-3.</b> Características del PLA .....	42
<b>Tabla 17-3.</b> Procedimiento para realizar el análisis estático .....	44
<b>Tabla 18-3.</b> Procedimiento para realizar el análisis estático .....	46
<b>Tabla 19-3.</b> Procedimiento para realizar el análisis estático .....	48
<b>Tabla 20-3.</b> Procedimiento para realizar el análisis estático .....	49
<b>Tabla 21-3.</b> Procedimiento para realizar el análisis estático .....	49
<b>Tabla 22-3.</b> Análisis estático acople antebrazo (Tensiones) .....	50
<b>Tabla 23-3.</b> Análisis estático acople antebrazo (Deformación).....	51
<b>Tabla 24-3.</b> Análisis estático acople antebrazo (Factor de seguridad) .....	51
<b>Tabla 25-3.</b> Tipo de impresora .....	52
<b>Tabla 26-3.</b> Evaluación de alternativas, tipos de impresora.....	53
<b>Tabla 27-3.</b> Configuración de la impresora.....	55

<b>Tabla 28-3.</b> Proceso de impresión 3D .....	59
<b>Tabla 29-3.</b> Características del Nylon .....	63
<b>Tabla 30-3.</b> Características del servomotor .....	65
<b>Tabla 31-3.</b> Grados de libertad de la prótesis .....	68
<b>Tabla 32-3.</b> Análisis prótesis .....	70
<b>Tabla 33-3.</b> Prótesis masculina vs prótesis femenina .....	71
<b>Tabla 1-4.</b> Tiempo de impresión .....	72
<b>Tabla 2-4.</b> Análisis prótesis .....	73
<b>Tabla 3-4.</b> Cronograma .....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2</b>	Antropometría de la mano.....	7
<b>Figura 1-3.</b>	Componentes Go!scan 50.....	16
<b>Figura 2-3.</b>	Interfaz del software VXelements.....	16
<b>Figura 3-3.</b>	Preparación del muñón a escanear .....	18
<b>Figura 4-3.</b>	Conexión al scanner .....	18
<b>Figura 5-3.</b>	Conexión a la computadora.....	19
<b>Figura 6-3.</b>	Barra superior de herramientas – Configuración del escáner.....	19
<b>Figura 7-3.</b>	Operación de configuración del scanner .....	20
<b>Figura 8-3.</b>	Ventana de navegación-Opción <i>Escanear</i> .....	21
<b>Figura 9-3.</b>	Escanear superficie.....	21
<b>Figura 10-3.</b>	Escanear superficie.....	22
<b>Figura 11-3.</b>	Muñón escaneado.....	23
<b>Figura 12-3.</b>	Obtención del modelo STL .....	24
<b>Figura 13-3.</b>	Obtención del modelo CAD .....	24
<b>Figura 14-3.</b>	PLA .....	26
<b>Figura 15-3.</b>	Hilo nylon.....	28
<b>Figura 16-3.</b>	Mano humana.....	30
<b>Figura 17-3.</b>	Modelo CAD de la mano .....	38
<b>Figura 18-3.</b>	Modelo CAD vs mano humana.....	38
<b>Figura 19-3.</b>	Antebrazo humano .....	39
<b>Figura 20-3.</b>	Modelo CAD vs antebrazo humano .....	40
<b>Figura 21-3.</b>	Modelo CAD de la prótesis .....	41
<b>Figura 22-3.</b>	Modelo CAD de la prótesis .....	41
<b>Figura 23-3.</b>	Creación del material PLA.....	43
<b>Figura 24-3.</b>	Aplicación del material PLA.....	43
<b>Figura 25-3.</b>	Zonas a analizar en el análisis estático de la palma de la mano .....	44
<b>Figura 26-3.</b>	Análisis estático (Tensiones).....	46
<b>Figura 27-3.</b>	Análisis estático (Deformaciones).....	47
<b>Figura 28-3.</b>	Análisis estático (Factor de seguridad) .....	47
<b>Figura 29-3.</b>	Modelo antebrazo, análisis estático.....	48

<b>Figura 30-3.</b> Impresora Rostock Max V3 .....	53
<b>Figura 31-3.</b> Simplify 3D.....	54
<b>Figura 32-3.</b> Configuración de la impresora .....	54
<b>Figura 33-3.</b> Preparación de la impresora .....	59
<b>Figura 34-3.</b> Preparación de la impresora .....	61
<b>Figura 35-3.</b> Preparación de la impresora .....	61
<b>Figura 36-3.</b> Preparación de la impresora .....	62
<b>Figura 37-3.</b> Preparación de la impresora .....	62
<b>Figura 38-3.</b> Preparación de la impresora .....	63
<b>Figura 39-3.</b> Microservo .....	64
<b>Figura 40-3.</b> Microservos montados en el antebrazo .....	64
<b>Figura 41-3.</b> Prótesis impresa.....	65
<b>Figura 42-3.</b> Prótesis impresa.....	66
<b>Figura 43-3.</b> Grados de libertad, falange proximal horizontal .....	67
<b>Figura 44-3.</b> Grados de libertad, ángulo de abducción .....	67
<b>Figura 45-3.</b> Rotación de la muñeca .....	68
<b>Figura 46-3.</b> Ajuste del acople al muñón .....	69
<b>Figura 47-3.</b> Ajuste de la prótesis al acople .....	69

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3.</b> Metodología para el diseño y construcción de la prótesis .....	10
<b>Gráfico 2-3.</b> Parámetros de diseño de la prótesis ergonómica .....	11
<b>Gráfico 3-3.</b> Proceso de escaneo 3D .....	17
<b>Gráfico 4-3.</b> Método de diseño para la obtención de un modelo 3D.....	29
<b>Gráfico 5-3.</b> Componentes de la prótesis ergonómica .....	29
<b>Gráfico 6-3.</b> Proceso de impresión 3D .....	58

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** MANUAL DE USO DE LA PRÓTESIS

**ANEXO B:** PLANOS DE LA PRÓTESIS

**ANEXO C:** ANÁLISIS ESTÁTICO

## **RESUMEN**

La presente propuesta tecnológica propuso fomentar la vinculación de la academia con la sociedad, con el diseño y construcción de una prótesis ergonómica de antebrazo y mano derecha por medio de tecnologías de escaneo 3D, modelado CAD e impresión 3D, para un caso real de estudio suscitado en el IESS (Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social) de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi. Por medio de un análisis antropométrico del paciente se obtuvieron las dimensiones de la prótesis; por medio del escaneado 3D se obtuvo el modelo tridimensional del muñón; con el modelado CAD se diseñaron falanges, palma de la mano, antebrazo y acople que conforman la prótesis; finalmente la impresión 3D de cada componente constituyen la metodología de diseño y construcción del presente proyecto. El sistema mecánico de la prótesis está compuesto por servomotores cuyo movimiento se comunica a los dedos de la mano mediante hilos conductores de nylon debido a su alta resistencia a la tracción, su costo moderado y la elasticidad que posee. La prótesis obtenida es funcional con 15 grados de libertad para los dedos y muñeca que simulan el movimiento de una articulación normal; es estética con una textura lisa y el color piel que se asemeja a las características del ser humano; es ergonómica porque se ajusta a las dimensiones antropométricas de la paciente (longitud: 32 cm y diámetro muñón: 22 cm) y posee un peso de prótesis total de (492,54 gramos); es estable y se ajusta perfectamente al muñón debido al acople con correas de sujeción que posee; no es hermética por lo que se recomienda no sumergirle en líquidos; está construida a base de un material biodegradable (PLA) por lo que no es tóxica para la salud del paciente, el análisis estático realizado me permite trabajar en sujeciones a pesos de 12 libras en agarre y transporte. Previa a la utilización de la prótesis se recomienda adiestrar al paciente sobre el uso adecuado de la misma empleando el manual de usuario elaborado.

**PALABRAS CLAVE:** <ESCANEADO 3D>, <MODELO CAD>, <IMPRESIÓN 3D>, <ANÁLISIS ANTROPOMÉTRICO>, <ANÁLISIS ESTÁTICO>, <PRÓTESIS ERGONÓMICA>



## **SUMMARY/ABSTRACT**

The present technological proposal suggested promoting the association of the academy and society, with the design and construction of an ergonomic prosthesis of forearm and right hand through technologies of 3D scanning, CAD modeling and 3D printing, for a real case study at the IESS (Ecuadorian Social Security Institute) in the city of Latacunga, Cotopaxi province. The dimensions of the prosthesis were obtained by means of an anthropometric analysis of the patient; the 3D model of the stump was acquired by scanning 3D, the CAD modeling was used to design phalanges, palm of the hand, forearm and coupling that make up the prosthesis; Finally, the 3D printing of each component constitutes the design and construction methodology of the present project. The mechanical system of the prosthesis is composed of servomotors whose movement is communicated to the fingers of the hand by means of nylon conductive wires due to its high tensile strength, moderate cost and the elasticity that it possesses. The prosthesis obtained is functional with 15 degrees of freedom for the fingers and wrist that simulate the movement of a normal joint; it is aesthetic with a smooth texture and skin color that resembles the characteristics of the human being; is ergonomic because it fits the patient's anthropometric dimensions (length: 32 cm and stump diameter: 22 cm) and has a total prosthesis weight of (492, 54 grams); it is secure and fits perfectly to the stump due to the coupling with fastening straps that it has; it is not hermetic so it is recommended not to submerge it in liquids; it is built on a biodegradable material (PLA) so it is not toxic to the patient's health, the static analysis performed allowed to work on fasteners to 12 pounds in grip and transport. Before the employment of the prosthesis, it is recommended to train the patient on the proper use of it through the prepared user manual.

**KEY WORDS:** < 3D SCAN > < CAD MODEL >, < 3D PRINTING >, < ANTHROPOMETRIC ANALYSIS >, < STATIC ANALYSIS>, < ERGONOMIC PROSTHESIS>

# **1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Antecedentes**

Plinio el viejo (23-79 d. C) narró la historia de un general romano al cual le amputaron el brazo y se le construyó una mano de hierro que tenía la función de sujetar su escudo y así él pueda batallar de nuevo. En los años 50 con el término de prótesis bio-compatible incursiona en la medicina la aplicación de extremidades artificiales para sustitución de miembros del cuerpo amputados. Los egipcios fabricaban prótesis de fibras biológicas y no biológicas, pero tenían un fin únicamente estético ya que no presentaban ninguna funcionalidad. En 1858 en Italia se descubrió una prótesis de hierro, bronce y madera que data del año 300 A.C. En la edad media no se evidencia una evolución en el diseño y la construcción de prótesis ya que limitaron al clásico gancho y a la pata de palo cuya función únicamente era la de sustituir el miembro perdido. En el renacimiento se retoma el tema de la prótesis en conjunto a las nuevas perspectivas generadas por la medicina, como principales materiales hierro, acero, cobre y madera para su elaboración. Ambroise Paré, francés, diseño un mecanismo de flexión en la pata de palo con control de bloqueo de rodilla, un arnés ajustable; cuyo mecanismo se usa incluso en la actualidad. Más tarde el francés Lorrain sustituyó los materiales típicos por cuero, papel y pegamento en lugar de los materiales pesados. Sin embargo, pese a la evolución de la construcción de las prótesis, los métodos que se utilizaban para implementarlas en los afectados eran inhumanos se los cauterizaba con hierro al rojo vivo, el aplastar el miembro y el corte mediante la guillotina. En varios casos estos métodos producían la muerte por infección de los elementos utilizados, por la pérdida excesiva de sangre. USA a causa de las guerras incursionó en la fabricación de prótesis creando la "Asociación Estadounidense de Ortoprótisis", creando convenios con las compañías militares para sus investigaciones. (Quinga, 2018)

## **1.2 Planteamiento del problema**

Según (Consejo Nacional Para la Igualdad de Discapacidades, 2019) en Ecuador existen 468.537 personas con discapacidad; Un 46,63% poseen discapacidad física, de estos muchos se deben a una amputación parcial o total de miembros superiores o inferiores, lo cual imposibilita al afectado a realizar tareas cotidianas como cepillarse los dientes, vestirse, comer, entre otras actividades básicas. La sustitución del miembro del cuerpo por una prótesis es la mejor alternativa para mejorar la calidad de vida del afectado; en el Ecuador no existen muchos centros especializados en el diseño y

construcción de prótesis y los escasos centros que laboran enfrentan problemas, como: la carencia de personal capacitado, los elevados costos de fabricación, etc.

El grupo de investigación en nuevas tecnologías, información, comunicación y procesos “AUTOPRO”, conscientes de la problemática social y comprometidos con el mejoramiento de la calidad de vida del ser humano; tiene como propósito diseñar y construir una prótesis a un costo accesible, de fácil manipulación e instalación, para un caso real de estudio que se presentó en el IESS de la ciudad de Latacunga con una persona del género femenino de 22 años, que no posee el antebrazo y mano derecha como consecuencia de un accidente. Además, no tiene movilidad en la mano izquierda, imposibilitando de esta forma que la afectada lleve a cabo sus tareas cotidianas.

Bajo este contexto se ha identificado la necesidad de construir una prótesis de antebrazo y mano derecha empleando la impresión 3D. La característica principal de la prótesis es su ergonomía ya que debe adaptarse a las características antropométricas del beneficiario lo cual se logra mediante un escaneo 3D. Este diseño debe cumplir con características específicas para obtener los detalles deseados para su posterior impresión 3D. Logrando de esta manera mejorar la calidad de vida de la persona (caso de estudio) con una prótesis impresa en 3D de bajo costo, fácil de manipular e instalar.

### **1.3 Justificación**

La presente propuesta tecnológica es de carácter social ya que mediante la implementación de una prótesis ergonómica de antebrazo y mano derecha se mejora la calidad de vida de una mujer de 22 años que fue amputada dichos miembros del cuerpo a causa de un accidente, devolviéndole la capacidad de volver a realizar tareas cotidianas sencillas como cepillarse los dientes, comer o peinarse. La pérdida parcial o total de una extremidad es una condición que dificulta el normal desarrollo de dichas actividades y esto conlleva a que la persona afectada sufra traumas emocionales y psicológicos.

El costo comercial de una prótesis con las características planteadas es muy elevado y generalmente se la adquiere fuera del país, según (Cedillo, 2017) sólo la prótesis de pulgar tiene un costo de 2500 dólares. Es por ello que personas con un nivel económico medio o bajo en la mayoría de situaciones no aspiran a adquirir una prótesis que mejore su calidad de vida. El presente proyecto mediante la impresión 3D pretende romper este paradigma y construir la prótesis a un costo accesible para la población más vulnerable.

El diseño de la prótesis es ergonómico porque se determina las dimensiones de la mano y el antebrazo del paciente, es decir, es una prótesis hecha a la medida del paciente ya que se ajusta a su forma y a sus medidas antropométricas. Además se adapta a todas las posiciones que pueda adoptar el cuerpo, incrementando la calidad de vida del paciente y su independencia. Por lo mencionado se justifica plenamente la elaboración del presente trabajo de titulación.

## **1.4 Objetivos**

### *1.4.1 Objetivo general*

Diseñar y construir una prótesis ergonómica de antebrazo y mano derecha por medio de tecnologías de escaneo 3D, modelado CAD e impresión 3D.

### *1.4.2 Objetivos específicos*

- Escanear el muñón para diseñar el acople entre la prótesis y brazo.
- Obtener las medidas antropométricas del brazo amputado mediante el brazo existente en el paciente femenino.
- Diseñar el modelo CAD de la mano y antebrazo con las medidas antropométricas obtenidas.
- Imprimir las partes de la prótesis en una impresora 3D.
- Ensamblar las piezas impresas en 3D de la prótesis considerando las medidas femeninas.

## **2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Estado del arte**

El estado del arte comprende los antecedentes investigativos que constituyen el fundamento teórico y metodológico para desarrollar el presente trabajo de titulación.

- (Cedillo, 2017) autor del trabajo denominado “Diseño y construcción de una prótesis ergonómica de pulgar” menciona que la ergonomía desempeña un rol fundamental para mejorar la calidad de vida del beneficiario ya que la prótesis debe adaptarse a sus características antropométricas, comodidad y aspecto estético; lo cual se logra mediante la utilización de un scanner 3D. Para el diseño se empleó softwares CAD CAM para obtener modelos 3D de cada componente de la prótesis y posteriormente mediante la impresión 3D construir el pulgar. Para la construcción con esta tecnología se debe tomar en cuenta parámetros como la velocidad de impresión y la temperatura del plástico.
- (Matiz & Pinzón, 2017) autores del trabajo denominado “Fabricación de prótesis transradial” mencionan que las medidas antropométricas del usuario deben tomarse en medios asépticos para evitar errores sistemáticos que alteren la parametrización apropiada de los componentes, de otra manera los componentes no se acoplarán correctamente o la prótesis no quedara dimensionalmente apropiada para el usuario.
- (Tierra, 2017) autor del trabajo “Desarrollo de una prótesis mioeléctrica de brazo de bajo costo, para un niño de un año de edad con el defecto congénito de brida amniótica” manifiesta que para el dimensionamiento de la estructura de la prótesis pasando por un proceso de escalado en relación a su mano derecha, se imprimieron las partes de la mano en piezas 3D de dos tipos de materiales, Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) para el sector de la mano por la característica de dureza del material y Poliacido Láctico (PLA) para el antebrazo por ser un polímero resistente y ligero.

## **2.2 Bases teóricas**

### *2.2.1 Personas con capacidades especiales*

Según la ONU el término capacidades especiales hace alusión a la interacción de personas cuya capacidad física para desarrollar tareas rutinarias ha disminuido o suprimido temporal o permanentemente debido a una o más deficiencias físicas, mentales, o sensoriales. Las personas con capacidades especiales físicas evidencian limitaciones en el área motora que no le permiten llevar a cabo acciones de la vida cotidiana de forma independiente o llevarlas a cabo como las desarrollan la mayoría de personas. Este tipo de capacidades comúnmente se manifiestan visiblemente en el cuerpo ya que los afectados usan elementos auxiliares y ayudas técnicas como sillas de ruedas, prótesis y bastones, para compensar su limitación y mejorar su autonomía. (Quinga, 2018)

### *2.2.2 Amputación transradial*

Amputación que se realiza por medio del hueso del radio (en medio del antebrazo). En este nivel de amputación el amputado conserva su articulación de codo. Las causas principales son los accidentes o las enfermedades y como consecuencia la persona sufre afecciones psicológicas y físicas. El afectado por motivo de la amputación es vulnerable a la discriminación de las demás personas ya que ésta altera su presentación o imagen, afectando considerablemente su autoestima, la amputación puede ser temporal o permanente afectando sus costumbres y quizás sufra la pérdida de su trabajo.

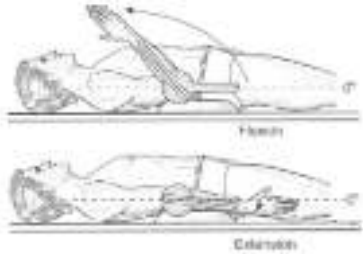
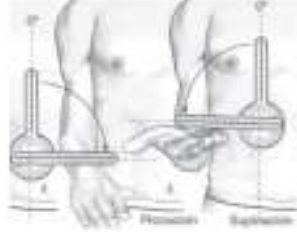


### *2.2.3 Antebrazo y mano*

El antebrazo es la parte del cuerpo humano comprendida entre el codo y la muñeca. El término hace alusión a la parte inferior del brazo y está conformado por dos huesos: el cúbito y el radio, paralelos entre sí, siendo el cúbito más largo que el radio. (Huaroto, 2019)

La mano es el órgano distal del miembro superior de una persona que interactúa con el entorno por lo que es considerada como uno de los componentes más importantes del cuerpo debido a las funciones que cumple en la vida diaria de un individuo brindándole la facilidad de llevar a cabo múltiples movimientos, indispensables para la supervivencia y relación con el medio ambiente. (Jara & Gorosito, 2017)

Los movimientos articulares del antebrazo y la mano pueden clasificarse de manera general en:

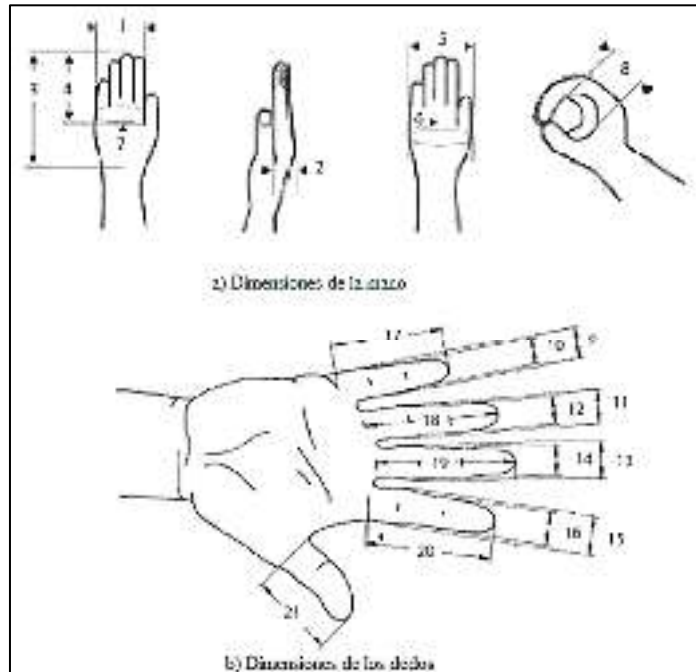
**Tabla 1-2** Movimientos articulares

Referencia anatómica	Articulación	Movimiento	RdM Min/Max	Ilustración
Antebrazo	Codo	Flexión	0°/150°	
		Extensión	0°/10°	
	Radiocubital proximal y radiocubital distal	Pronación	0°/90°	
		Supinación	0°/90°	
Mano	Muñeca	Flexión	0°/50°-60°	
		Extensión	0°/35°-60°	
	Muñeca	Desviación radial	0°/25°-30°	
		Desviación cubital	0°/30°-40°	

Fuente: (Lobato, 2016)

### 2.2.4 Antropometría

La antropometría estudia el cuerpo humano en cuanto a sus dimensiones y proporciones se refiere, a fin de aplicar las mediciones obtenidas en estudios de ingeniería, medicina, ergonomía, etc. Los resultados obtenidos en la evaluación antropométrica permiten dimensionar adecuadamente puestos de trabajo, diseño de prótesis o ayudas ortopédicas, etc. En cuanto a la antropometría de la mano existen diversas medidas importantes que se pueden obtener de registros antropométricos básicos de la mano. (Lesmes, 2017)



**Figura 1-2** Antropometría de la mano

Fuente: (Quinga, 2018)

### 2.2.5 Ergonomía



La UNE EN ISO 6385: 2004 define a la Ergonomía como la disciplina científica que trata de las interacciones entre los seres humanos y otros elementos de un sistema, equipo, máquina, herramienta o producto. La Ergonomía toma en cuenta el factor físico, fisiológico, biomecánico, las capacidades psicológicas y optimiza la efectividad y productividad al tiempo que garantiza la seguridad, salud y bienestar de los trabajadores. Un ejemplo práctico de Ergonomía es el diseño y construcción de prótesis ya que se realiza en base a las medidas antropométricas de un paciente porque debe ser compatible con su cuerpo. (Fernandez & Goodman, 2018)

### 2.2.6 Prótesis

Las extremidades artificiales, también conocidas como prótesis, se definen como dispositivos que se utilizan para reemplazar una parte del cuerpo o miembro faltante. Son una parte vital de la rehabilitación, proceso después de una amputación y ayuda a restaurar la movilidad de los pacientes, lo que lleva a mejores resultados para los pacientes. El uso de prótesis cumple tres tipos de requisitos: operacional, visible y social. Los usuarios de prótesis señalan que la dignidad y la autoestima mejorada son un aspecto crítico del uso del dispositivo. (Hall & Orzada, 2017)



**Tabla 2-2** Clasificación de prótesis según su nivel de amputación

Clasificación	Descripción	Imagen
Nivel transradial o por debajo del codo	Una prótesis transradial reemplaza la función de la mano, la muñeca y antebrazo hasta el codo. Se necesita de un encaje protésico que se acopla a un muñón para imitar la forma natural del antebrazo, en la terminación del antebrazo se acopla una mano pasiva o activa.	
Nivel transhumeral o por arriba del codo	Una prótesis transhumeral reemplaza la función del brazo y antebrazo. El encaje protésico se acopla a un muñón a través de una estructura tubular. Tiene una articulación pasiva o activa de codo y mano.	

Fuente: (Tierra, 2017)

### 2.2.7 Escaneo 3D

El escaneo 3D es un proceso para determinar la forma de la superficie de un objeto o su volumen en un espacio tridimensional. Las mediciones precisas en 3D derivadas de un objeto escaneado son útiles para la inspección de materiales y el control de calidad. Si una tecnología de escaneo 3D es capaz de recolectar una gran cantidad de datos 3D del objeto escaneado, tiene la capacidad de recrear un modelo digital 3D preciso y de alta resolución del objeto del mundo real. ( LMI Technologies, 2013)

### 2.2.8 Modelado CAD

El diseño asistido por computadora (CAD) consiste en aplicar sistemas informáticos para ayudar al proceso de ingeniería para crear, modificar, analizar y optimizar un diseño. Algunas de las ventajas del CAD son: la obtención de dibujos con mayor precisión, la velocidad del proceso de diseño y el producto se introduce con mayor rapidez en el mercado, los sistemas CAD permiten el ahorro radical de dinero y tiempo en el desarrollo y pruebas de un prototipo. (Aldaz & Farías, F., 2016)

### 2.2.9 Impresión 3D

La impresión 3D o la fabricación aditiva es un proceso de hacer tridimensional objetos sólidos agregando material capa por capa. Los objetos físicos son producidos por utilizando datos del modelo digital del modelo 3D. Al utilizar la impresión 3D es posible producir objetos de casi cualquier forma. Actualmente se utilizan muchas tecnologías y materiales de impresión. (European Commission, 2016). A continuación se detalla un listado de materiales que se utilizan para la impresión 3D.

**Tabla 3-2** Materiales para la impresión 3D

Material	Descripción	Material	Descripción
<p>ABS</p> 	El ABS es un plástico de alta resistencia, moldeable y soporta altas temperaturas.	<p>LAYWOO-D3</p> 	El laywoo-d3 es un compuesto de polvo de madera y polímeros; se lo utiliza para obtener texturas semejantes a la madera y se los puede pintar limar o cortar después de la impresión.
<p>PLA</p> 	El PLA es un material amigable con el ambiente, pero a diferencia del ABS es más liviano, no tiene buena resistencia ni trabaja a altas temperaturas.	<p>FILAFKEX</p> 	El filaflex es un filamento que debido a su elasticidad es moldeable después de la impresión. Tiene tiempos elevados de impresión. Permite simular la textura de piel en la fabricación de prótesis.

Fuente: (Tierra, 2017)

## 2.3 Marco legal

Los artículos citados a continuación pertenecen a la Constitución de la República del Ecuador y se enfocan en las personas con capacidades especiales.

**Art. 47.-** El Estado garantizará políticas de prevención de las discapacidades y, de manera conjunta con la sociedad y la familia, procurará la *equiparación de oportunidades para las personas con discapacidad y su integración social*.

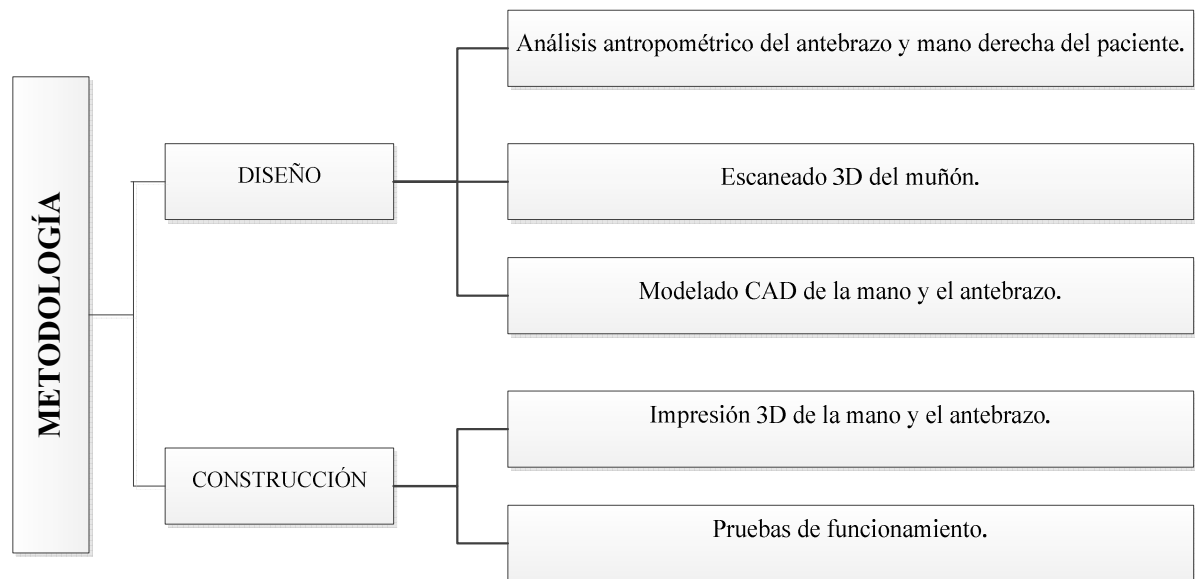
**Art. 48.-** El Estado adoptará a favor de las personas con discapacidad medidas que aseguren: *La inclusión social*, mediante planes y programas estatales y privados coordinados, que fomenten su participación política, social, cultural, educativa y económica.

El establecimiento de programas especializados para la atención integral de las personas con discapacidad severa y profunda, con el fin de alcanzar el máximo desarrollo de su personalidad, el fomento de su autonomía y la disminución de la dependencia.

El incentivo y apoyo para proyectos productivos a favor de los familiares de las personas con discapacidad severa.

### 3 METODOLOGÍA

La metodología describe el procedimiento para llevar a cabo el diseño y la construcción de la prótesis ergonómica de antebrazo y mano derecha.



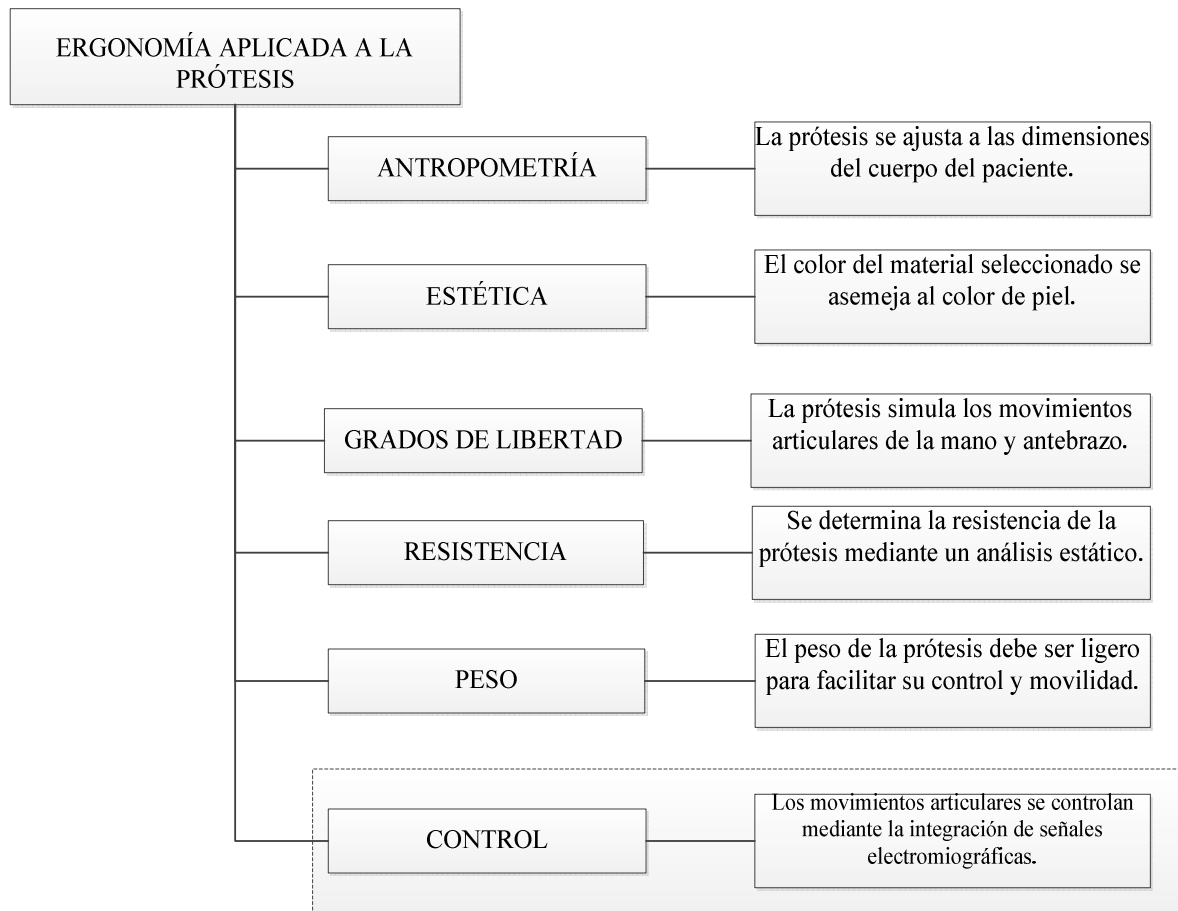
**Gráfico 1-3.** Metodología para el diseño y construcción de la prótesis

**Realizado por:** Estrada Omar, 2020

#### 3.1 DISEÑO DE LA PRÓTESIS

##### 3.1.1 Parámetros de diseño y construcción

La prótesis debido a la tecnología de modelado CAD, escaneo 3D e impresión 3D reúne características imprescindibles como el costo moderado en contraste al costo alto de las prótesis que se ofertan en el mercado. Sin embargo su característica principal es la ergonomía ya que se ajusta a las medidas antropométricas del paciente, el material seleccionado para la impresión está diseñado para obtener una estética similar a la del cuerpo humano y el diseño de la prótesis está orientado a simular los movimientos articulares del antebrazo-mano. Cabe mencionar que una vez culminado el presente trabajo de titulación mediante el desarrollo del proyecto denominado *Integración de señales electromiográficas para el control de una prótesis de mano* se controlará los movimientos de la prótesis construida, por tal motivo el control no es menester del presente proyecto.



**Gráfico 2-3.** Parámetros de diseño de la prótesis ergonómica

Realizado por: Estrada Omar, 2020


### 3.1.2 Hoja de datos del paciente

La señorita Myriam Patricia Musuña Pilliza de 22 años de edad, procedente del cantón Pujilí de la provincia de Cotopaxi realizó una solicitud dirigida a la Carrera de Ingeniería Industrial de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; en la cual dio a conocer su necesidad por adquirir una prótesis de antebrazo y mano derecha. La joven sufrió una amputación transradial (debajo del codo) del brazo derecho como consecuencia de un accidente eléctrico generado por una fuente de alta tensión. El accidente se generó cuando sus dos hermanos realizaban la conexión de una antena de televisión y por infortunio con el mástil de la antena tuvieron contacto directo con un cable de alta tensión sufriendo una descarga eléctrica, la joven al visualizar el accidente y con el afán de ayudar a sus hermanos quiso separarlos del cable de alta tensión, los tocó y sufrió un choque eléctrico que expulsó su cuerpo a varios metros de distancia generándole quemaduras graves en su antebrazo y mano derecha y más tarde la amputación de dichos miembros, mientras que sus hermanos murieron

directamente. Además la joven en su solicitud manifestó la carencia de los recursos económicos necesarios para adquirir la prótesis, es por ello, que la Espoch mediante el presente trabajo de titulación busca vincular el desarrollo de la investigación con una problemática social de la sociedad.

La información detalla se resume a continuación en la hoja de datos del paciente.

**Tabla 1-3.** Hoja de datos del paciente

HOJA DE DATOS DEL PACIENTE			
Nombres y Apellidos	Myriam Patricia Musuña Pilliza	Edad	22 años
Sexo	Femenino	Estado civil	Soltera
Provincia	Cotopaxi	Cantón	Pujilí
Ocupación	Ninguna	Discapacidad	Física
Amputación	Amputación transradial por debajo del codo.		
Descripción de la discapacidad	La paciente fue amputada el antebrazo y la mano derecha a la edad de 16 años a causa de un accidente generado por una descarga eléctrica con una fuente de alta tensión.		
			

**Realizado por:** Estrada Omar, 2020



### 3.1.3 *Análisis antropométrico*

El análisis antropométrico se realiza con el fin de adaptar la prótesis a la forma y las dimensiones del cuerpo del paciente, el resultado del análisis es el registro de las medidas del antebrazo y la mano

izquierda que servirán como referencia para el dimensionamiento de la prótesis ya que estos valores son una réplica del antebrazo y mano derecha debido a la simetría del cuerpo humano.

La toma de las medidas antropométricas se realiza con una cinta métrica y no mediante un proceso de escaneado 3D ya que como se mencionó anteriormente la paciente sufrió quemaduras graves que deformaron el miembro superior del paciente. Por este motivo si se utilizará el escaneo 3D se obtendrían las medidas del brazo deformado.

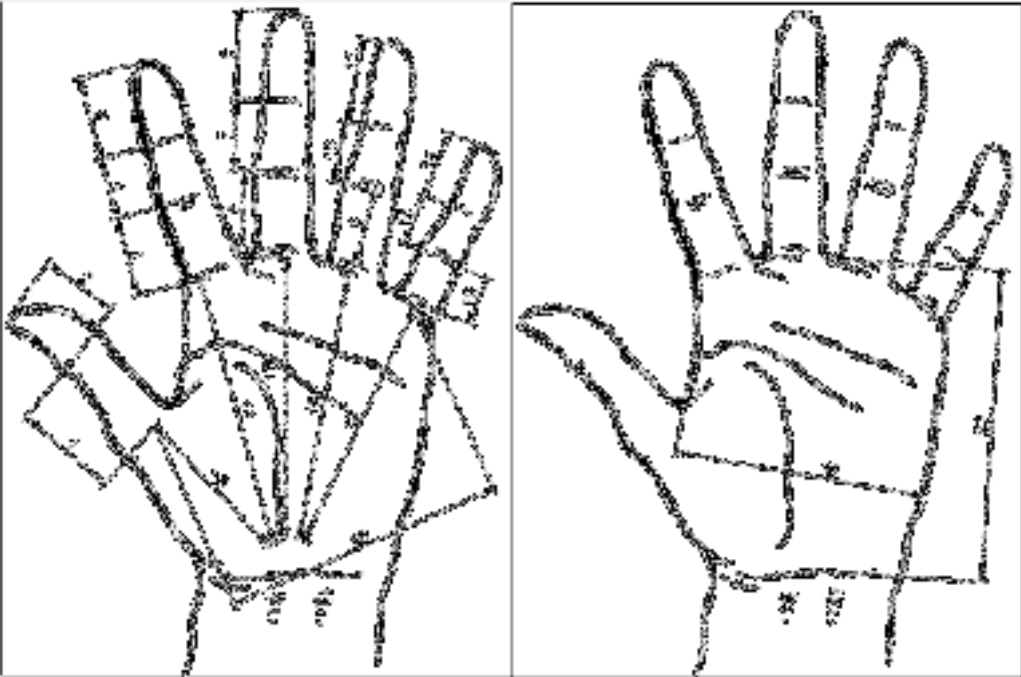
**Tabla 2-3.** Análisis antropométrico

Parte del cuerpo	Descripción	Imagen
<b>Antebrazo</b>	<p>Las medidas del antebrazo registradas son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro del antebrazo izquierdo (20 cm).</li> <li>• Del hombro izquierdo a la muñeca (50 cm)</li> <li>• Longitud del muñón derecho (8 cm).</li> <li>• Diámetro del muñón derecho (22 cm).</li> </ul>	
<b>Mano</b>	<p>Las medidas de la mano registradas son: falanges, metacarpos, ancho y largo de la palma.</p> <p>Las dimensiones se detallan en la Tabla 3-3.</p> <p><i>Análisis antropométrico de la mano.</i></p>	

**Realizado por:** Estrada Omar, 2020

Las medidas registradas se utilizan para realizar el modelado CAD del antebrazo y la mano derecha de la prótesis.

**Tabla 3-3.** Análisis antropométrico de la mano

				
N°	Nombre	Divisiones	Medida (Cm)	Perímetro (Cm)
1	Pulgar	Proximal	3	5,5
2		Distal	3	5,5
3	Índice	Proximal	5	5,5
4		Medial	3	5
5		Distal	3	4
6	Medio	Proximal	5	5,5
7		Medial	3	4,5
8		Distal	3	4
9	Anular	Proximal	5	5,5
10		Medial	3	4,5
11		Distal	3	4
12	Meñique	Proximal	3	4,5
13		Medial	2	4
14		Distal	2	3,5
15	Metacarpios	I - Pulgar	4	
16		II - Índice	6	
17		III - Medio	6	
18		IV - Anular	6	
19		V - Meñique	6	
20	Pulgar - Meñique		8	
21	Palma	Ancho	5	
22		Largo	6,5	

Realizado por: Estrada Omar, 2020

### 3.1.4 Escaneado del muñón

El escaneado del muñón (extremo del brazo derecho amputado) se utiliza para diseñar el acople de sujeción de la prótesis al brazo amputado. El scanner utilizado pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, la cual, sensible a la necesidad de la Srta. Myriam Musuña de adquirir una prótesis ha brindado su apoyo mediante la prestación del equipo para el escaneado.

#### 3.1.4.1 Go!scan 50

El nombre del scanner 3D empleado es *Go!scan 50* y es de origen Canadiense. Su fabricante Creaform desarrollo el equipo con la capacidad generar rápidamente la superficie de cualquier cuerpo complejo, lo que hace posible obtener medidas precisas a partir del primer escaneado. Diseñado para escanear cualquier objeto sin necesidad de configuración, ofrece una textura y adquisición de geometrías perfecta; las especificaciones del equipo se detallan en la *Tabla 4-3. Especificaciones del scanner Go!scan 50*.

**Tabla 4-3.** Especificaciones del scanner Go!scan 50

Especificaciones del scanner Go!scan 50			
<b>Fabricante</b>	Creaform	<b>Dimensiones (mm)</b>	150x171x251
<b>País</b>	Canadá	<b>Tipo de scanner</b>	Profesional
<b>Tecnología</b>	Luz estructurada	<b>Resolución (mm)</b>	0,5
<b>Frecuencia</b>	550,000 m /s	<b>Precisión (mm)</b>	0,10
<b>Rango de operación</b>	0,3 – 3,0 m	<b>Peso (Kg)</b>	0,95
<b>Software</b>	VXelements	<b>Conectividad</b>	USB
<b>Formato de exportación</b>	.dae, .fbx, .ma, .obj, .ply, .stl, .txt, .wrl, .x3d, .x3dz, .zpr	<b>Tamaño de escaneo máximo</b>	380x380



**Fuente:** Creaform, 2020



El Go!scan 50 está conformado por los siguientes elementos: una cámara superior, una cámara inferior, una cámara de textura, un proyector de luz blanca, y un gatillo para disparador. Como se puede observar en la *Figura 1-3. Componentes Go!scan 50*.



**Figura 1-3.** Componentes Go!scan 50

Fuente: Go!scan 3D de Creaform, 2020

#### 3.1.4.2 VXelements

El scanner Go!scan50 mediante la aplicación del software VXelements genera la nube de puntos del muñón escaneado. La nube está conformada por millones de puntos posicionados en el espacio tridimensional, formando con exactitud milimétrica el muñón y representando su superficie externa. En la Figura 2-3 se visualiza el interfaz del software y sus componentes.

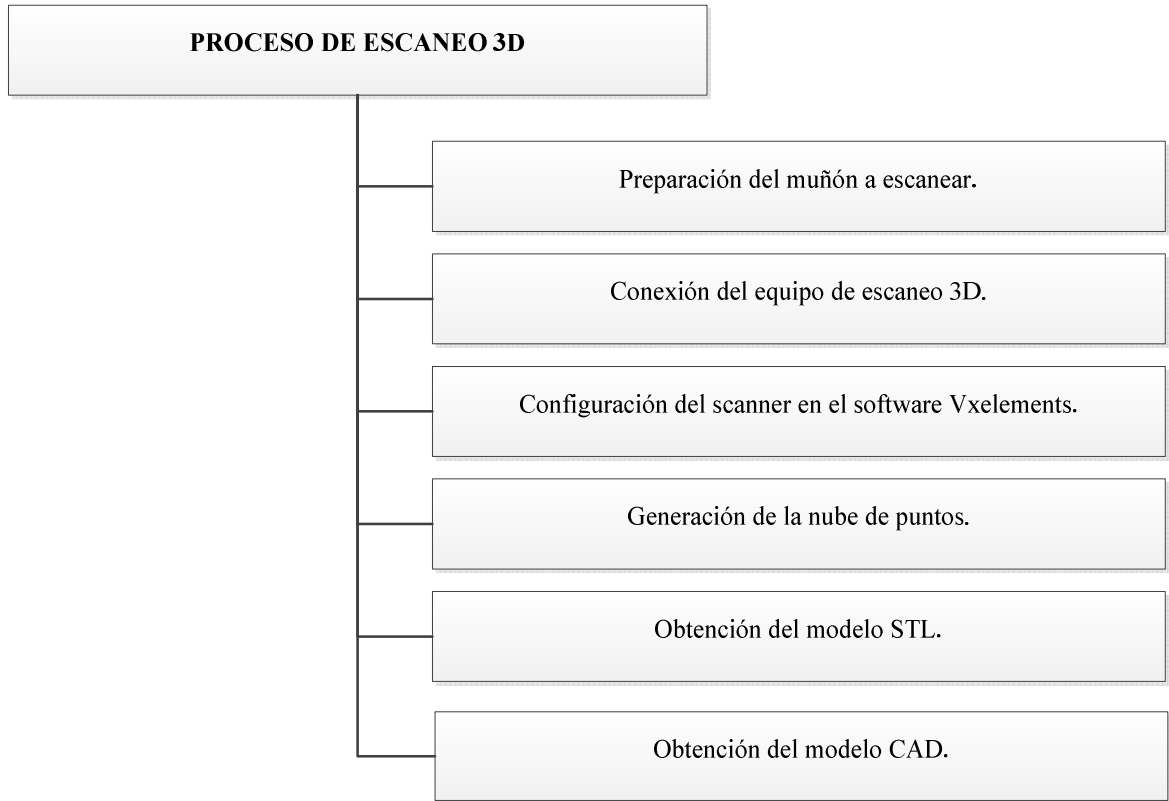


**Figura 2-3.** Interfaz del software VXelements

Fuente: Go!scan 3D de Creaform, 2020

#### 3.1.4.3 Proceso de escaneado

Para realizar el proceso de escaneado se realiza el siguiente proceso:



**Gráfico 3-3.** Proceso de escaneo 3D

**Realizado por:** Estrada Omar, 2020

- *Preparación del muñón a escanear*

El muñón debe estar libre de polvo o cualquier impureza, es por ello que previo al proceso de escaneado se debe limpiar su superficie. Además se debe posicionar a la persona ya sea de pie o sentada, e indicarle que debe mantener la posición estática del muñón durante el proceso de escaneado a fin de minimizar los errores de forma en la geometría obtenida, caso contrario, es necesario repetir el proceso las veces que sean necesarias hasta obtener el resultado deseado. La forma en que se va desarrollando el proceso de escaneo y como va tomando forma el muñón se visualizará en todo momento en la pantalla de escaneo a fin de reducir espacios obtenidos que deformen el modelo, para ello es necesario una conexión adecuada del equipo de escaneo 3D.



**Figura 3-3.** Preparación del muñón a escanear

Realizado por: Estrada Omar, 2020

- *Conexión del equipo de escaneo 3D*

La conexión del equipo de escaneo 3D Go!scan 50 es sencilla y no requiere de experiencia previa debido a su facilidad de uso, se realiza por medio de un cable que posee dos conectores. El extremo del cable que se conecta en el scanner es *macho* y posee una flecha en la parte superior que debe coincidir con el orificio *hembra* del scanner, como se puede visualizar en la *Figura 4-3. Conexión al scanner*.



**Figura 4-3.** Conexión al scanner

Realizado por: Estrada Omar, 2020

El extremo del cable que se conecta en la computadora posee un conector USB, como se puede visualizar en la *Figura 5-3. Conexión a la computadora*.



**Figura 5-3.** Conexión a la computadora  
Realizado por: Estrada Omar, 2020

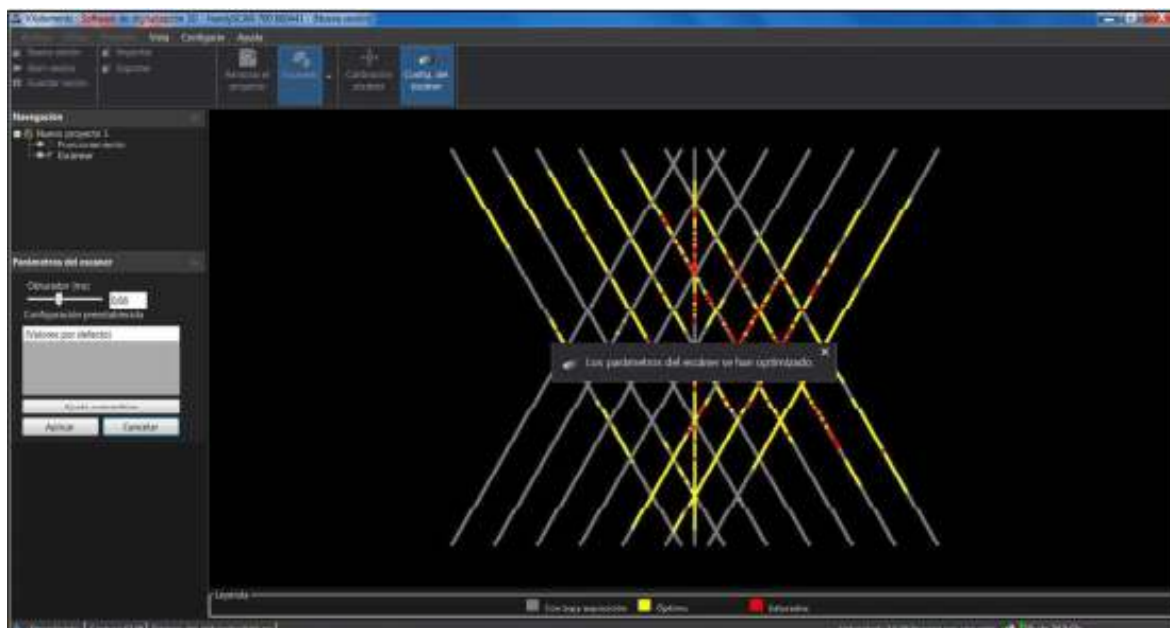
- *Configuración del scanner en el software*

Una vez realizada la conexión del equipo se procede a configurar el scanner en el software Vxelements. La configuración del scanner es el reconocimiento de las condiciones del material del objeto y de la iluminación del entorno. Para realizar este proceso en la barra superior de herramientas del software se da clic sobre la opción “*Config. del escáner*” (Ver Figura 6-3. Barra superior de herramientas – Configuración del escáner).



**Figura 6-3.** Barra superior de herramientas – Configuración del escáner  
Realizado por: Estrada Omar, 2020

A continuación, se debe dar clic en la opción “Ajuste automático” y apuntar al muñón con el scanner a una distancia de 30 cm. Se presiona el gatillo del scanner (Ver Figura 1-3) y manteniéndolo presionado se realiza un barrido en el muñón. Al realizar este proceso, en la pantalla se visualizará la *Figura 7.3 Operación de configuración del scanner*. Una vez que el software haya finalizado el proceso de configuración del scanner aparecerá el mensaje “Los parámetros del escáner se han optimizado”.



**Figura 7-3.** Operación de configuración del scanner

Realizado por: Estrada Omar, 2020

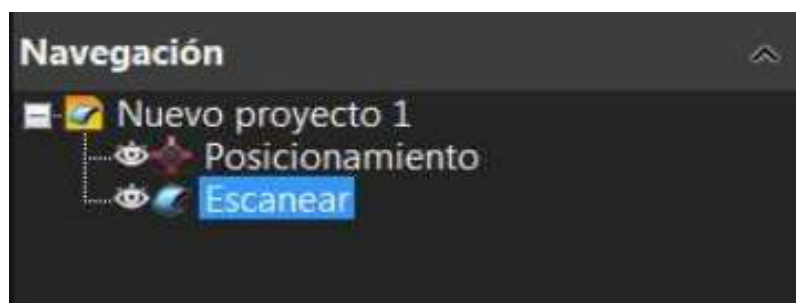
Adicionalmente en el software se puede configurar los siguientes parámetros: velocidad del obturador, resolución, optimización de frontera, entre otros; lo cual se resume en la *Tabla 5-3 Parámetros de escaneado*. Los valores ingresados en los parámetros son el resultado de la experiencia del diseñador.

**Tabla 5-3.** Parámetros de escaneado

Parámetros de escaneado		
<b>Resolución</b>	0.30	
<b>Optimizar la malla de digitalización</b>	0	
<b>Reducir la malla de digitalización</b>	0	
<b>Optimización de fronteras</b>	20	
<b>Llenar agujeros automáticamente</b>	0	
<b>Borrar las parcelas aisladas</b>	0	

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Para ingresar los valores descritos en la Tabla 5-3 se debe dar clic en la opción “Escanear” de la ventana de Navegación.

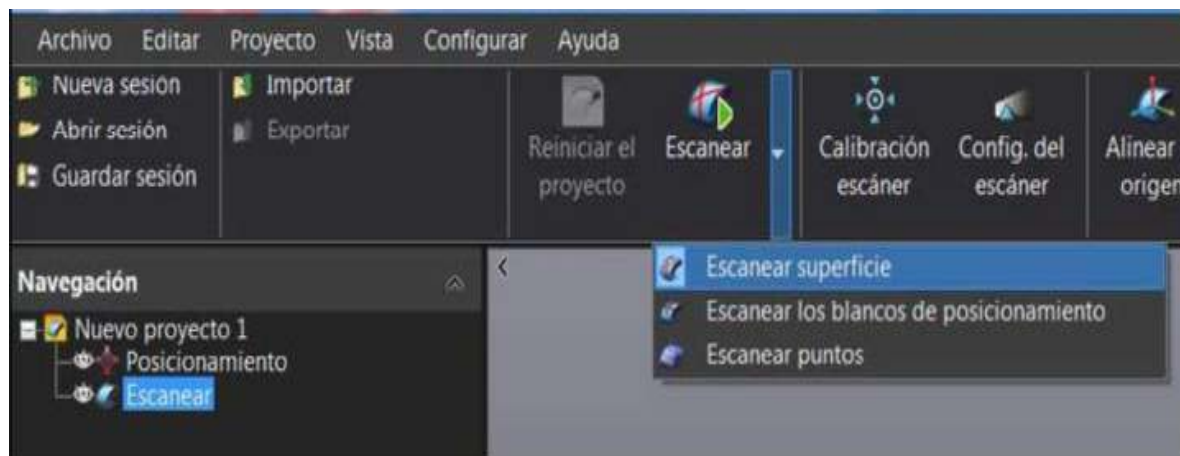


**Figura 8-3.** Ventana de navegación-Opción *Escanear*

Realizado por: Estrada Omar, 2020

- *Generación de la nube de puntos*

Una vez finalizada la configuración del escaneo se procede a la generación de la nube de puntos, es decir, a escanear el muñón; para lo cual se da clic en la opción “Escanear superficie” de la barra de herramientas del software como se indica en la Figura 9-3.



**Figura 9-3.** Escanear superficie

Realizado por: Estrada Omar, 2020

A continuación se dirige el scanner hacia el muñón y se enciende el scanner, reflejándose así los haces de luz sobre el muñón con lo cual el equipo empieza a escanear. Los haces de luz se proyectan sobre toda la superficie del muñón dirigiendo el scanner como si se tratara de un proceso de pintura con soplete (Ver Figura 10-3).



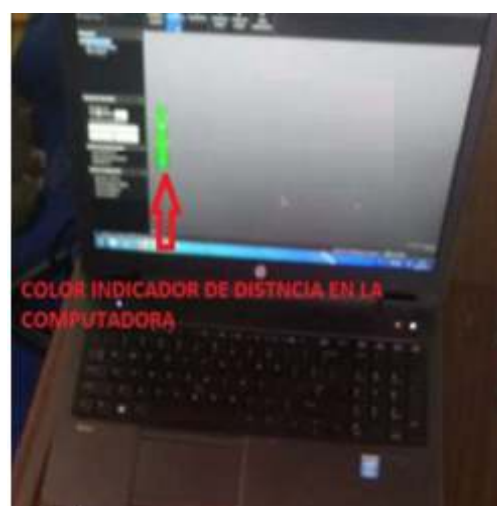
**Figura 10-3.** Escanear superficie

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Al momento del escaneado el equipo debe mantenerse a una distancia adecuada lo cual nos indica el software mediante una barra de colores cuyo significado se detalla en la *Tabla 6-3. Distancia de escaneo.*

**Tabla 6-3.** Distancia de escaneo

Barra de color	Distancia
Verde	Adecuada
Amarillo	Cerca
Rojo	Muy cerca
Celeste	Lejos
Azul intenso	Muy lejos



Realizado por: Estrada Omar, 2020

Una vez finalizado el proceso de escaneado, el resultado entregado por el scanner es la nube de puntos que se visualiza en la Figura 11-3.





**Figura 11-3.** Muñón escaneado

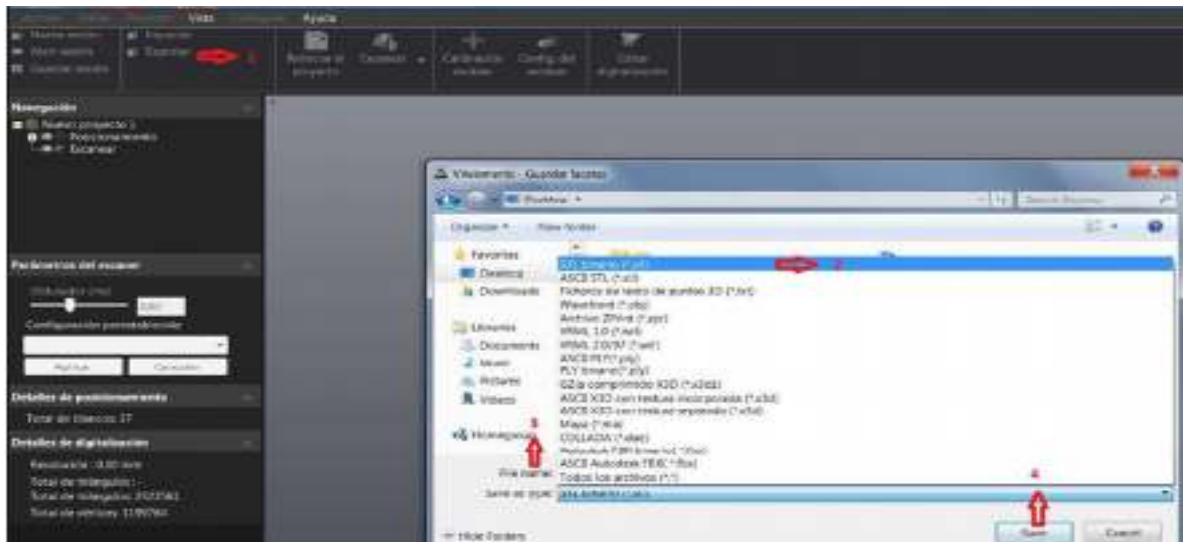
**Realizado por:** Estrada Omar, 2020

- *Exportar el modelo a formato STL*

Una vez generada la nube de puntos se exporta el modelo del muñón a formato STL, para lo cual se da clic en la opción “*Exportar*” de la barra de herramientas, se selecciona el tipo de archivo de exportación, se nombra y se guarda el archivo; como se muestra en la Figura 12-3.

El propósito de la exportación del muñón escaneado a formato STL es abrir el modelo en un software de ingeniería CAD, como Solidworks, para luego realizar todas las operaciones necesarias hasta obtener un sólido o una superficie. Esto se logra gracias a que la extensión STL es un tipo de archivo general. En el software CAD se puede realizar modificaciones para posteriormente transferir el modelo a un software CAM, en el caso de efectuar un mecanizado.

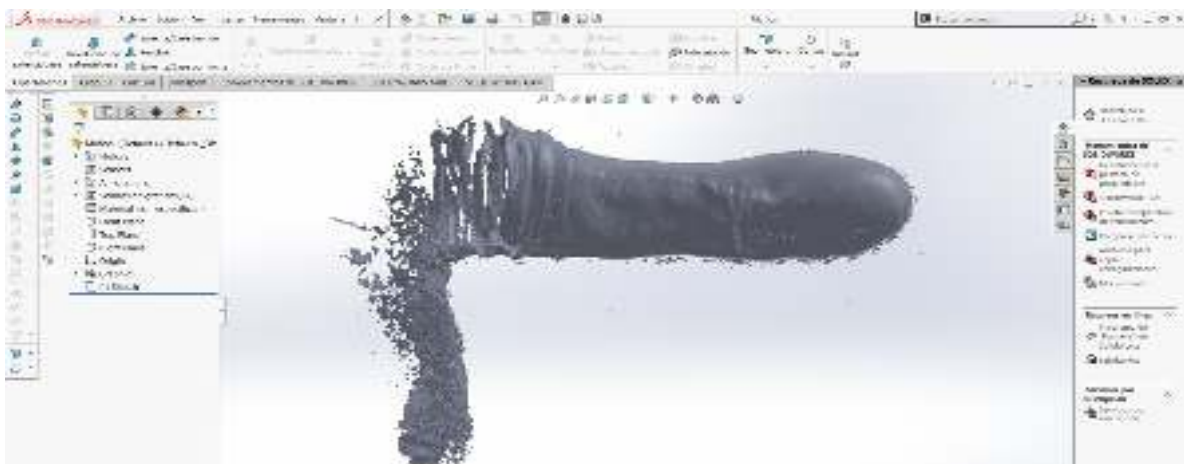




**Figura 12-3.** Obtención del modelo STL  
 Realizado por: Estrada Omar, 2020

- *Modelo CAD*

El modelo STL obtenido se transfiere al software Solidworks, en el cual se transformaran las superficies STL en sólidos. El motivo por el que se transfiere el modelo STL es que en contraste a Vxelements en el software CAD existe una variedad de herramientas que facilitan el proceso de manufactura posterior, en este caso, la impresión 3D. Además, una vez transferida la información a un software CAD, se puede dar la utilidad que se necesite como por ejemplo la realización de: ensambles, planos, fabricación de matrices de ese objeto, rediseños, manufactura aditiva, fabricación de prototipos, etc.



**Figura 13-3.** Obtención del modelo CAD  
 Realizado por: Estrada Omar, 2020

### 3.1.5 Selección de material para impresión

En la Tabla 7-3 se describe los tipos de material que se pueden utilizar para realizar la impresión 3D, los cuales son: ABS, PLA, LAYWOOD-D3 y FILAFLEX. El análisis de los materiales se realiza en base a sus propiedades físicas, mecánicas y el costo, lo cual se detalla en la tabla 7-3.

**Tabla 7-3.** Alternativas de selección, material de impresión

Material		Criterios de valorización				
		Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la tracción (MPa)	Elasticidad	Costo (Dólares)	Toxicidad
A	ABS 	1070	45	Baja	20,99	Sí
B	PLA 	1250	60	Baja	19,90	No
C	LAYWOOD-D3 	800	30	Baja	44,00	No
D	FILAFLEX 	1120	45	Alta	67,52	No

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Una vez establecidos los criterios de valorización se asigna a cada factor el peso (en una escala del 1 al 9) en base a la importancia que posea para la impresión de la prótesis, valorando el factor menos importante con el menor puntaje. Posteriormente se califica cada factor con una escala del 1 al 5. Finalmente por cada criterio de valorización se multiplica el peso por la calificación establecida, los resultados obtenidos se suman y aquella alternativa que posee el mayor puntaje es la seleccionada.

**Tabla 8-3.** Evaluación de alternativas, material de impresión

Factor	Peso	ALTERNATIVAS			
		A	B	C	D
Densidad	9	3 27	2 18	5 45	4 36
Resistencia a la tracción	9	4 32	5 45	3 27	4 36
Elasticidad	5	3 15	3 15	3 15	5 25
Costo	9	4 36	5 45	3 27	2 18
Toxicidad	7	3 21	5 35	5 35	5 35
Total		131	158	149	150

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Como resultado de la evaluación se determinó que la alternativa B constituye la mejor alternativa y corresponde al PLA debido principalmente a su resistencia a la tracción y el costo que son sus características que destacan sobre los otros materiales evaluados.





**Figura 14-3.** PLA

Fuente: Filament2print, 2020

### 3.1.6 Selección del hilo conductor

Para darle movimiento a los dedos de las prótesis se utiliza un sistema mecánico conformado por servomotores e hilos conductores, a continuación en la Tabla 9-3 se describe los tipos de hilo que se pueden para el sistema, los cuales son: Nylon, Poliéster, Polietileno y Polipropileno. El análisis de los materiales se realiza en base a sus propiedades físicas, mecánicas y el costo, lo cual se detalla en la Tabla 10-3.

**Tabla 9-3.** Alternativas de selección, hilo conductor

Material		Criterios de valorización				
		Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia a la tracción (MPa)	Alargamiento	Costo/Kg (Dólares)	Toxicidad
A	HILO DE NYLON 	1,15	76	60%	1,80	No
B	HILO DE POLIESTER 	1,33	50	50%	3,00	Sí
C	HILO DE POLIETILENO 	0,9	14	455%	2,80	No
D	HILO DE POLIPROPILENO 	0,9	25	50%	1,90	No

Realizado por: Estrada Omar, 2020

El proceso que se utiliza para la selección del hilo conductor es el mismo que se detalla en la selección del material para impresión, el resultado se detalla a continuación.

**Tabla 10-3.** Evaluación de alternativas, hilo conductor

Factor	Peso	ALTERNATIVAS			
		A	B	C	D
Densidad	7	3 21	4 28	5 35	5 35
Resistencia a la tracción	9	5 45	4 36	2 18	3 27
Elasticidad	9	4 36	3 27	5 45	4 36
Costo	9	5 45	2 18	3 27	4 36
Toxicidad	7	5 35	3 21	5 35	5 35
Total		182	130	160	169

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Como resultado de la evaluación se determinó que la alternativa A constituye la mejor alternativa y corresponde al hilo nylon debido principalmente a su resistencia a la tracción y el costo que son sus características que destacan sobre los otros materiales evaluados. Aunque también posee buena elasticidad solo el polietileno destaca sobre el nylon.

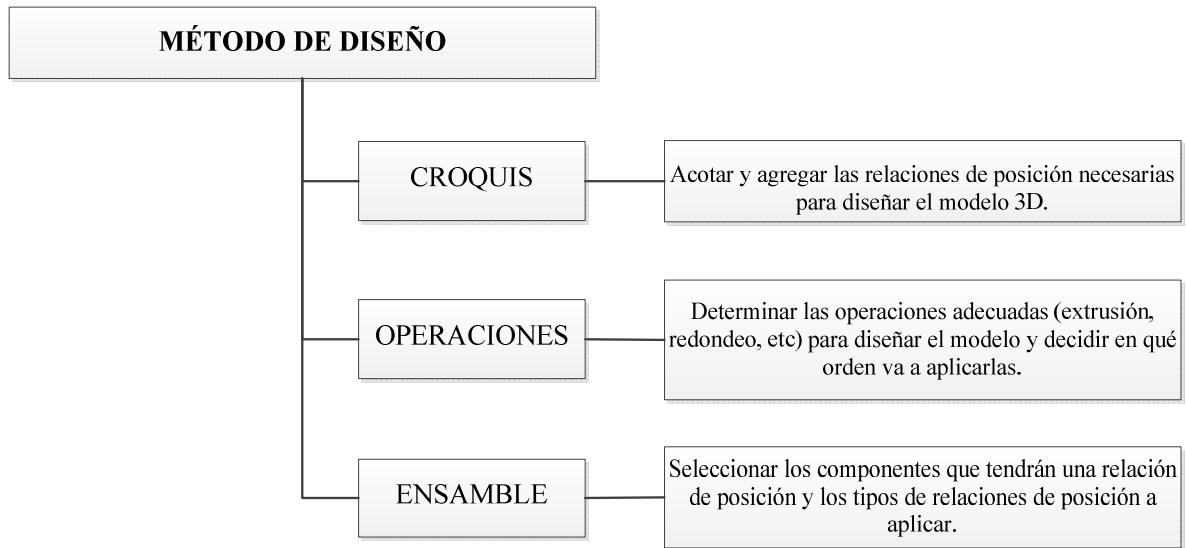


**Figura 15-3.** Hilo nylon

Fuente: <https://multiproductosyexpendables.com/products/hilo-nylon>

### 3.1.7 Modelado CAD de la prótesis ergonómica.

El objetivo del modelado CAD de la prótesis es recrear las características geométricas y funcionales de la mano y antebrazo derecho mediante la aplicación del software Solidworks, cuyo método de diseño se detalla en el Gráfico 4-3. Cada componente del modelo consta de uno o más croquis y de una o más operaciones. Los ensambles se realizan cuando el modelo consta de varios componentes.

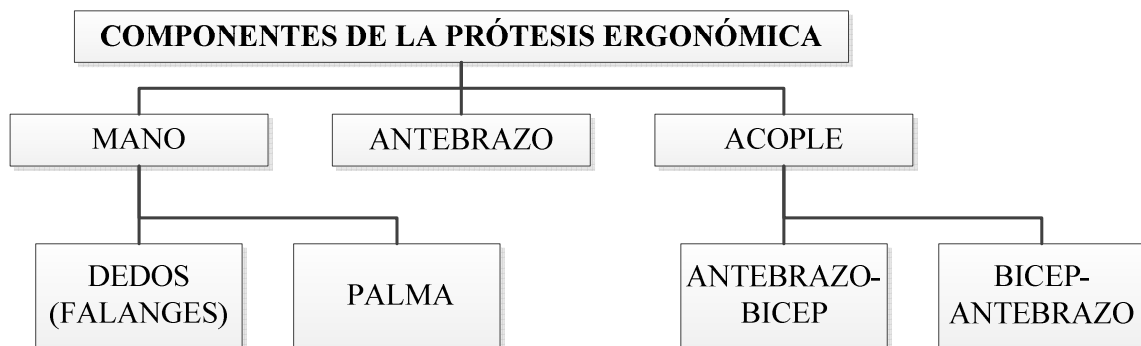


**Gráfico 4-3.** Método de diseño para la obtención de un modelo 3D

Realizado por: Estrada Omar, 2020

#### 3.1.7.1 Componentes de la prótesis

La prótesis ergonómica está compuesta de tres componentes: mano, antebrazo y acople.



**Gráfico 5-3.** Componentes de la prótesis ergonómica

Realizado por: Estrada Omar, 2020

### 3.1.7.2 Modelado CAD de la mano

Para obtener una perspectiva clara del diseño se visualiza la Figura 14-3, en la cual se determina que el modelo CAD de la mano de acuerdo a la anatomía humana estará compuesto por dos componentes: los dedos (pulgar, índice, medio, anular y meñique) y la palma. Cada dedo está compuesto por falanges (proximal, medial y distal) cuyas medidas se detallan en la Tabla 3-3 correspondiente al Análisis Antropométrico de la paciente.



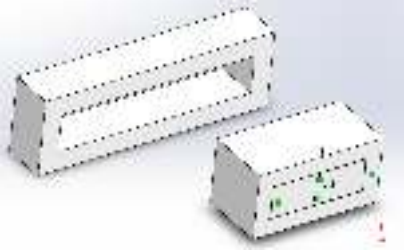
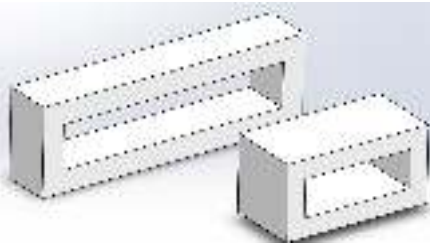
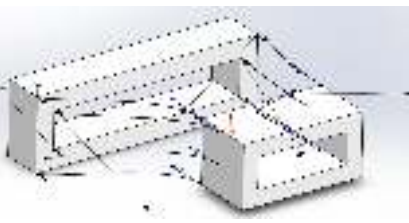
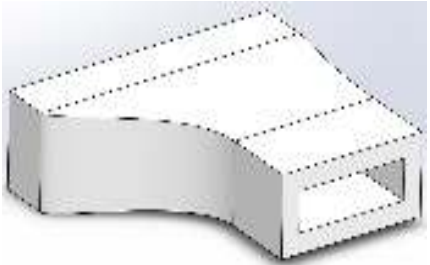
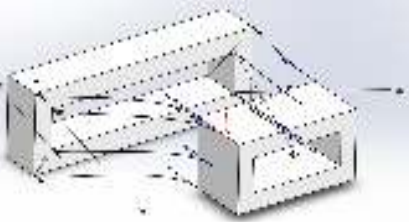
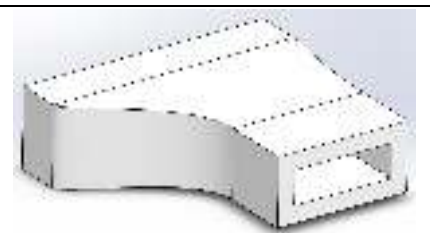
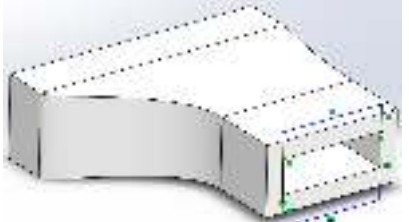
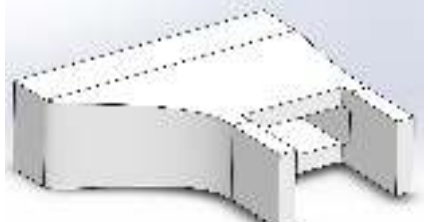
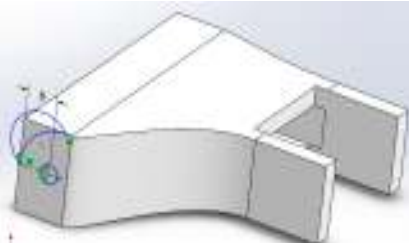
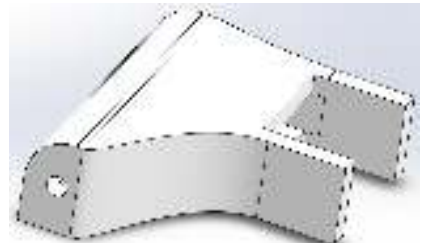
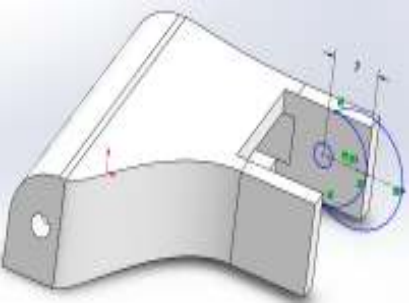
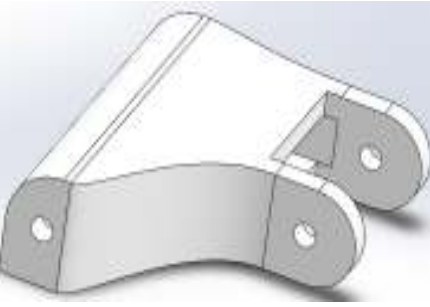
**Figura 16-3.** Mano humana  
Realizado por: Estrada Omar, 2020

Para diseñar el modelo CAD de las falanges se requiere una serie de operaciones (croquis, extrusión, corte, redondeado, entre otras) sistemáticas y ordenadas; el proceso de diseño es extenso hasta obtener el modelo final, para evidenciarlo a modo de ejemplo en la Tabla 11-3 se describe el diseño de la falange proximal del dedo pulgar.

**Tabla 11-3.** Modelo CAD de la falange


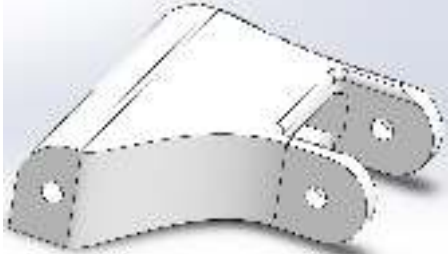

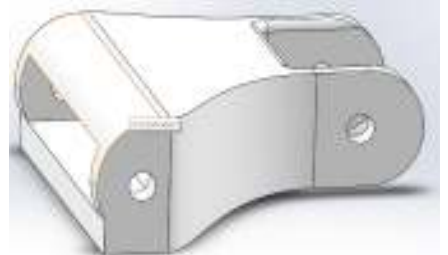
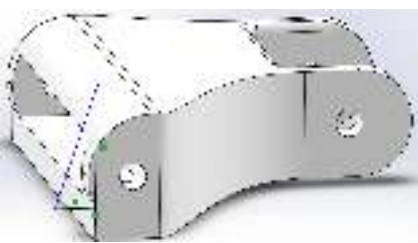
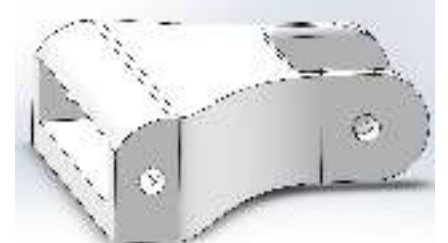
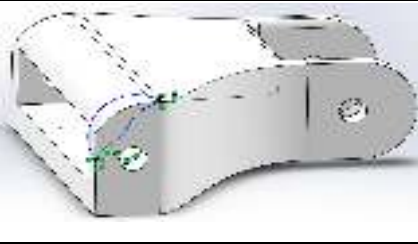
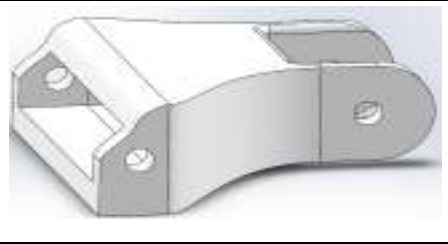
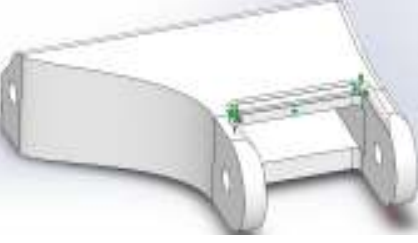
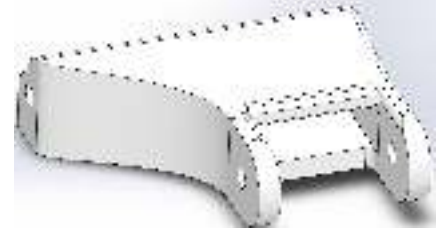
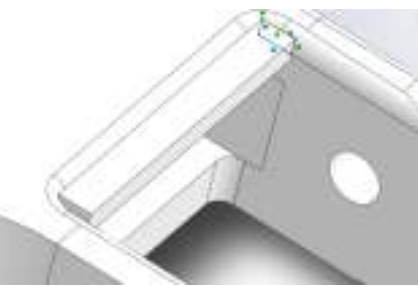
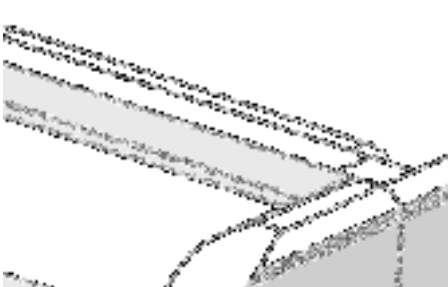
Croquis	Imagen	Operaciones	Imagen
Croquis 1		Extrusión 1	
Croquis 2		Extrusión 2	

**Tabla 11-3 (Continua).** Modelo CAD de la falange


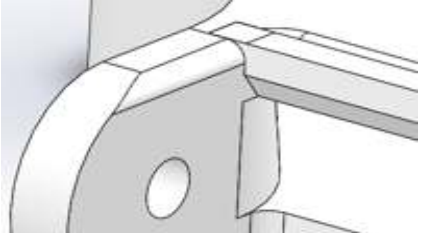
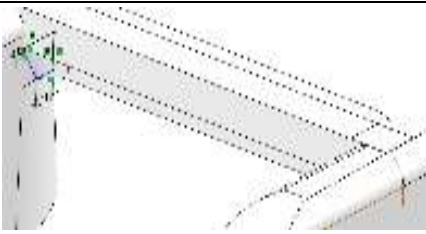

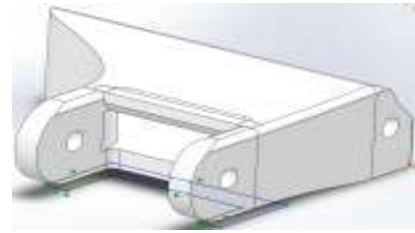
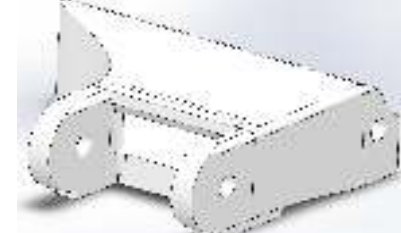
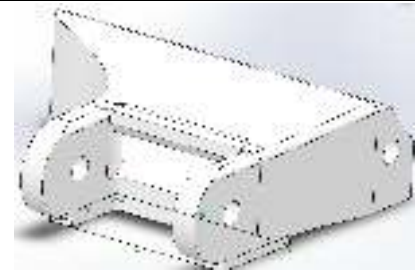
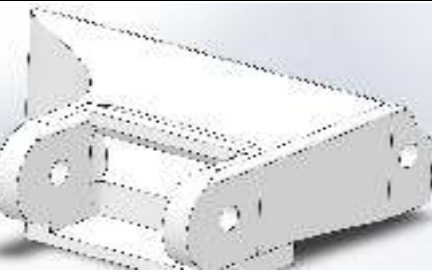
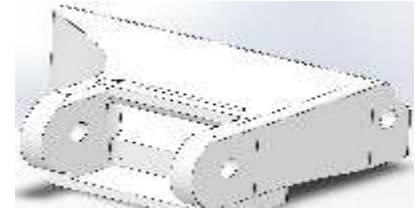
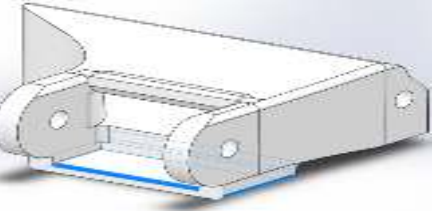
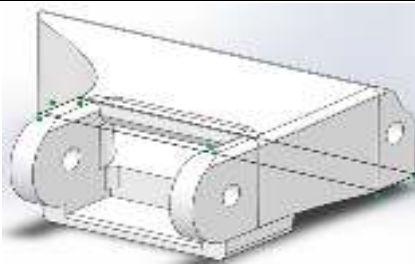
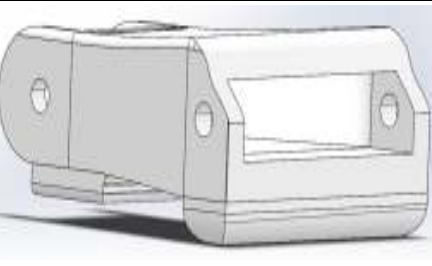
Croquis 3		Corte 1	
Croquis 4		Barrido 1	
Croquis 5		Corte 2	
Croquis 6		Corte 3	
Croquis 7		Corte 4	
Croquis 8		Corte 5	



**Tabla 11-3 (Continua).** Modelo CAD de la falange

No requiere croquis		Redondeo 1	
Croquis 9		Corte 6	
Croquis 10		Corte 7	
Croquis 11		Corte 8	
Croquis 12		Extrusión 3	
Croquis 13		Extrusión 4	

**Tabla 11-3 (Continua).** Modelo CAD de la falange

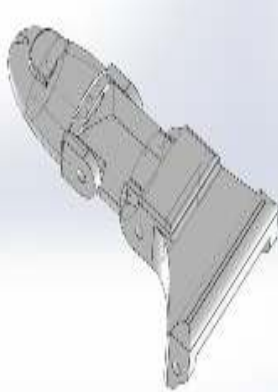



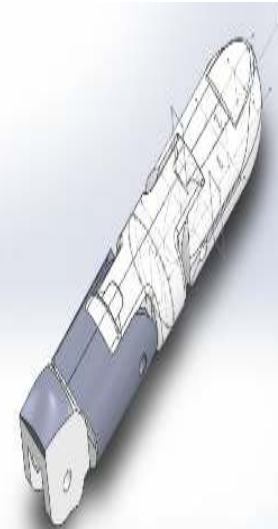

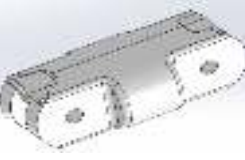

Croquis 14		Extrusión 5	
Croquis 15		Extrusión 6	
Croquis 16		Extrusión 7	
Croquis 17		Extrusión 8	
No requiere croquis		Redondeo 2	
Croquis 18		Saliente Extruir Redondeo 3	

Realizado por: Estrada Omar, 2020

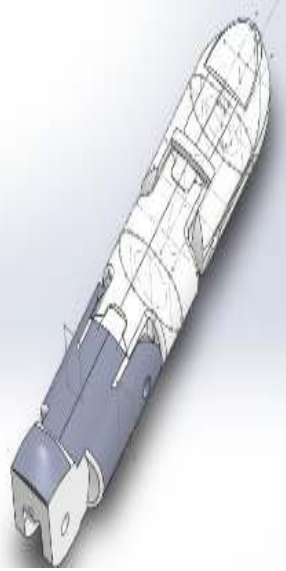

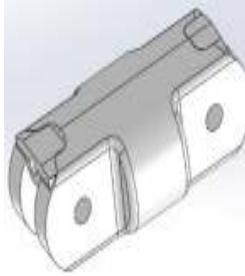

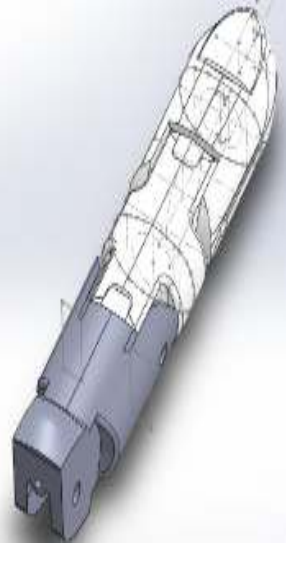
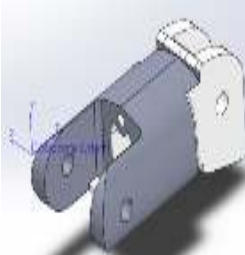


En resumen para diseñar la falange proximal del dedo pulgar se emplea las siguientes operaciones: 18 croquis, 8 extrusiones, o cortes, 3 redondeos y 1 barrido. Para el diseño del resto de componentes se aplica un proceso similar, en la Tabla 12-3 se resume todas las falanges diseñadas y en el Anexo A se detalla los planos obtenidos de cada componente.

Además en la Tabla 8-3 en la columna “*especificación*” se visualiza el peso de cada componente que depende del material con el que se va a imprimir la prótesis. La selección del material PLA se detalla posteriormente en el proceso de impresión.

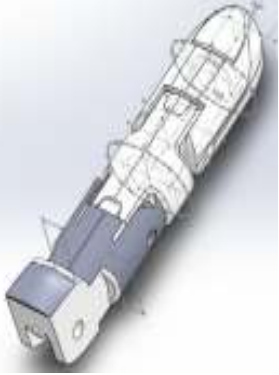

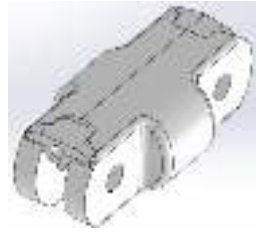

**Tabla 12-3.** Diseño de las falanges

Dedo	Falange	Imagen	Diseño	Especificación
<b>Pulgar</b> 	Metacarpio		Croquis: 17 Extrusión: 8 Corte: 8 Redondeo: 3 Barrido: 1	Peso = 10,97 g Longitud = 40 mm Material = PLA
	Proximal		Croquis: 14 Extrusión: 5 Corte: 9 Redondeo: 3	Peso = 5,81 g Longitud = 30 mm Material = PLA
	Distal		Croquis: 10 Extrusión: 4 Corte: 4 Redondeo: 7 Barrido: 2	Peso = 6,56 g Longitud = 30 mm Material = PLA
<b>Índice</b> 	Proximal		Croquis: 20 Extrusión: 5 Corte: 15 Redondeo: 5 Combinar: 1	Peso = 5,38 g Longitud = 50 mm Material = PLA
	Medial		Croquis: 14 Extrusión: 5 Corte: 9 Redondeo: 3	Peso = 4,56 g Longitud = 30 mm Material = PLA
	Distal		Croquis: 10 Extrusión: 4 Corte: 4 Redondeo: 7 Barrido: 2	Peso = 4 g Longitud = 30 mm Material = PLA

**Tabla 12-3 (Continua).** Diseño de las falanges

<p>Medio</p> 	Proximal		<p>Croquis: 20 Extrusión: 5 Corte: 15 Redondeo: 5 Combinar: 1</p>	<p>Peso = 4,58 g Longitud = 50 mm Material = PLA</p>
	Medial		<p>Croquis: 14 Extrusión: 5 Corte: 9 Redondeo: 3</p>	<p>Peso = 4,71 g Longitud = 30 mm Material = PLA</p>
	Distal		<p>Croquis: 10 Extrusión: 4 Corte: 4 Redondeo: 7 Barrido: 2</p>	<p>Peso = 4 g Longitud = 30 mm Material = PLA</p>
<p>Anular</p> 	Proximal		<p>Croquis: 20 Extrusión: 5 Corte: 15 Redondeo: 5 Combinar: 1</p>	<p>Peso = 5 g Longitud = 50 mm Material = PLA</p>
	Medial		<p>Croquis: 14 Extrusión: 5 Corte: 9 Redondeo: 3</p>	<p>Peso = 4,56 g Longitud = 30 mm Material = PLA</p>
	Distal		<p>Croquis: 10 Extrusión: 4 Corte: 4 Redondeo: 7 Barrido: 2</p>	<p>Peso = 4 g Longitud = 30 mm Material = PLA</p>

**Tabla 12-3 (Continua).** Diseño de las falanges

 <p>Meñique</p>	Proximal		<p>Croquis: 20 Extrusión: 5 Corte: 15 Redondeo: 5 Combinar: 1</p>	<p>Peso = 3,6 g Longitud = 30 mm Material = PLA</p>
	Medial		<p>Croquis: 14 Extrusión: 5 Corte: 9 Redondeo: 3</p>	<p>Peso = 2,43 g Longitud = 20 mm Material = PLA</p>
	Distal		<p>Croquis: 10 Extrusión: 4 Corte: 4 Redondeo: 7 Barrido: 2</p>	<p>Peso = 2,25 g Longitud = 20 mm Material = PLA</p>

Realizado por: Estrada Omar, 2020

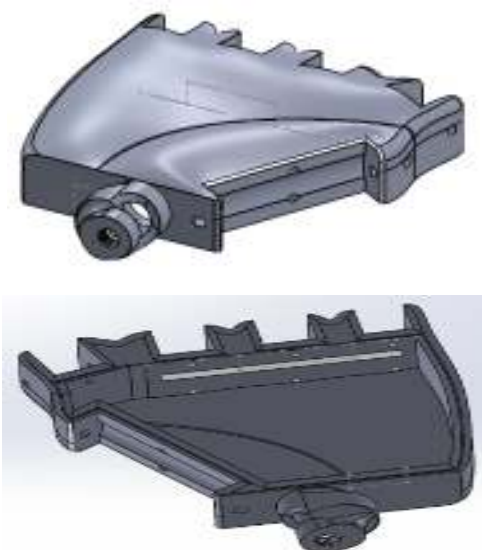
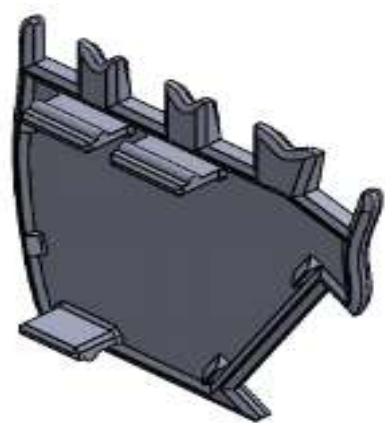
En resumen, el diseño CAD de los dedos posee las siguientes características:

- Las falanges proximales de cada dedo poseen una base que se acopla con la palma de la mano y en el otro extremo se localiza el acople al falange medial.
- Las falanges mediales poseen dos acoples, un extremo se acopla a la falange proximal y el otro extremo la falange distal.
- La base de las falanges distales se acopla con la falange medial.
- El interior de los dedos es una cavidad tubular que permite el paso del hilo conductor de nylon que sale desde el antebrazo hacia la base de la falange distal, lo cual se utiliza para controlar el movimiento de los dedos.
- Todos los componentes están diseñados para acoplarse entre ellos mediante ejes o pines que tienen la finalidad de establecer una sujeción adecuada y a la vez permitir el movimiento rotacional de los dedos.

Una vez culminado el diseño de los dedos se procede a diseñar la palma de la mano, la cual, en su parte superior cuenta con todos los acoples para las falanges proximales; en la parte lateral se localiza el acople al metacarpo del pulgar y en la parte inferior se encuentra el acople al antebrazo. El modelo obtenido se detalla en la Tabla 9-3.



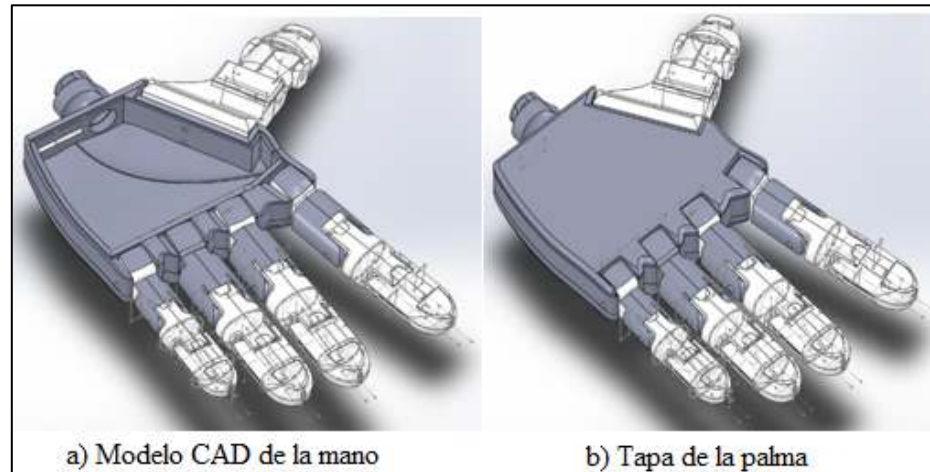
**Tabla 13-3.** Diseño de la palma de la mano

Componente	Imagen	Proceso de diseño	Especificación
Palma		<p>Croquis: 20  Corte: 3  Redondeo: 3  Diámetro de taladro: 6</p>	<p>Peso = 58,78 g  Ancho 5 cm  Largo 6,5 cm  Material = PLA</p>
Tapa de la palma		<p>Croquis: 20  Corte: 3  Redondeo: 3  Diámetro de taladro: 6</p>	<p>Peso = 14,16 g  Ancho 5 cm  Largo 6,5 cm  Material = PLA</p>

Realizado por: Estrada Omar, 2020

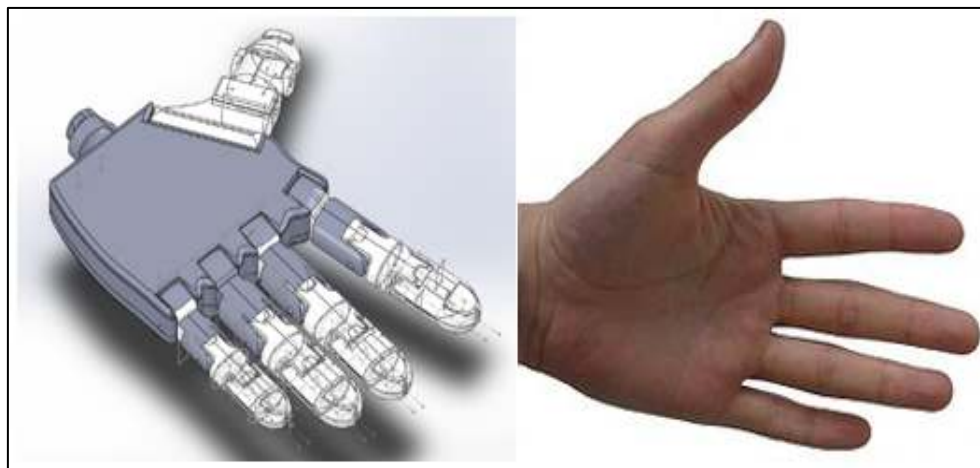
Los acoples de la palma de la mano con las falanges proximales mediante pines permiten la sujeción y el movimiento rotatorio de los dedos, además posee una cavidad por la cual se conduce el hilo conductor desde el antebrazo hacia la punta de los dedos facilitando así la funcionalidad y adaptabilidad de la mano.

Finalmente, con el modelo CAD de las falanges y la palma, en el software, se realiza un ensamble mediante relaciones de posición con el cual se obtiene la mano derecha de la prótesis (Ver Figura 15-3 y Figura 16-3).



**Figura 17-3.** Modelo CAD de la mano  
**Realizado por:** Estrada Omar, 2020

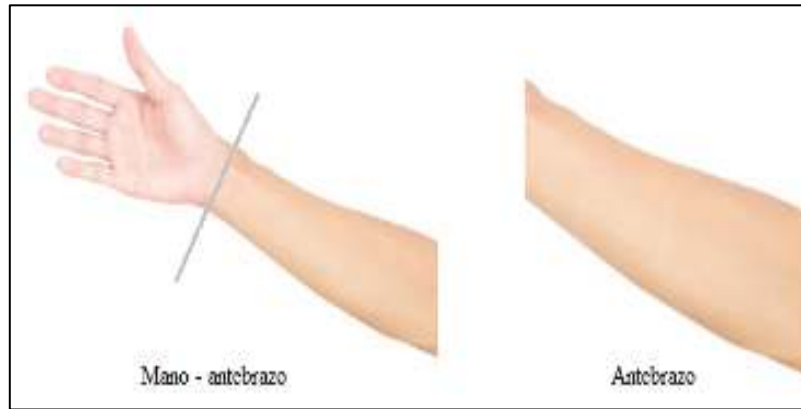
Como se puede apreciar en la Figura 16-3, en el modelo CAD diseñado no se obtiene exactamente el contorno curvilíneo que posee la mano humana. Pero en cuanto a la *forma* se observa que el modelo se asemeja a la de la mano real.



**Figura 18-3.** Modelo CAD vs mano humana  
**Realizado por:** Estrada Omar, 2020

### 3.1.7.3 Modelado CAD del antebrazo

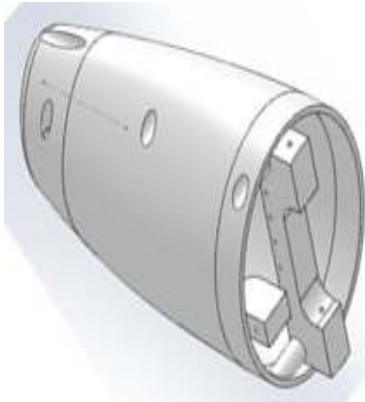
Para obtener una perspectiva clara del diseño del antebrazo se visualiza la Figura 17-3, en la cual se determina que esta parte del cuerpo posee una forma tubular cónica. Las dimensiones del antebrazo se describen en la Tabla 2-3 correspondiente al Análisis Antropométrico de la paciente.



**Figura 19-3.** Antebrazo humano  
Realizado por: Estrada Omar, 2020

El diseño del antebrazo no se realiza mediante componentes para conservar las dimensiones antropométricas de la paciente. Además el diseño por piezas podría dificultar su ensamble. Para diseñar el antebrazo en el software se requiere una serie de operaciones (croquis, extrusión, corte, redondeado, entre otras) sistemáticas y ordenadas, en la Tabla 10-3 se visualiza el resultado del modelo CAD.

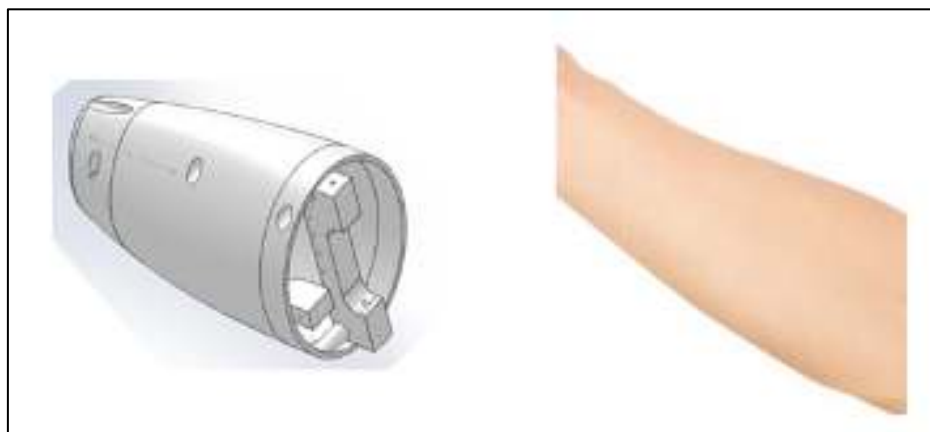
**Tabla 14-3.** Diseño del antebrazo

Componente	Imagen	Proceso de diseño	Especificación
Antebrazo		<p>Croquis: 32</p> <p>Corte: 16</p> <p>Redondeo: 4</p> <p>Extrusión: 10</p> <p>Barrido: 1</p> <p>Espesor: 1</p> <p>Montaje: 4</p> <p>Dividir: 1</p>	<p>Peso = 164,26 g</p> <p>Material = PLA</p> <p>Longitud = 142,85 mm</p> <p>Diámetro mayor = 92,17 mm</p> <p>Diámetro menor = 57,35 mm</p>

Realizado por: Estrada Omar, 2020

El diseño del antebrazo posee dos acoples, en la parte inferior se localiza el acople para la mano y en otro extremo se localizará el acople de la prótesis para el muñón de la paciente; la cavidad del antebrazo alojará el conjunto de servomotores que permitirá el movimiento de los dedos. Finalmente como se puede observar en la Figura 18-3, el modelo CAD se asemeja a la anatomía del antebrazo humano aunque no se obtiene exactamente su contorno curvilíneo.





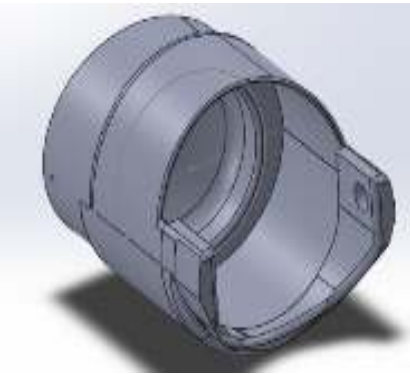
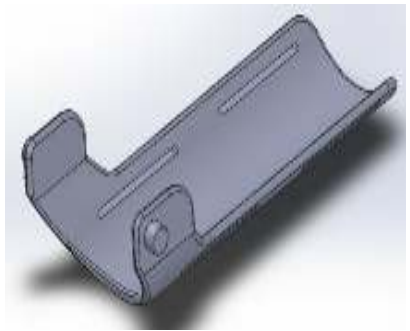
**Figura 20-3.** Modelo CAD vs antebrazo humano

Realizado por: Estrada Omar, 2020

#### 3.1.7.4 Modelado CAD del acople

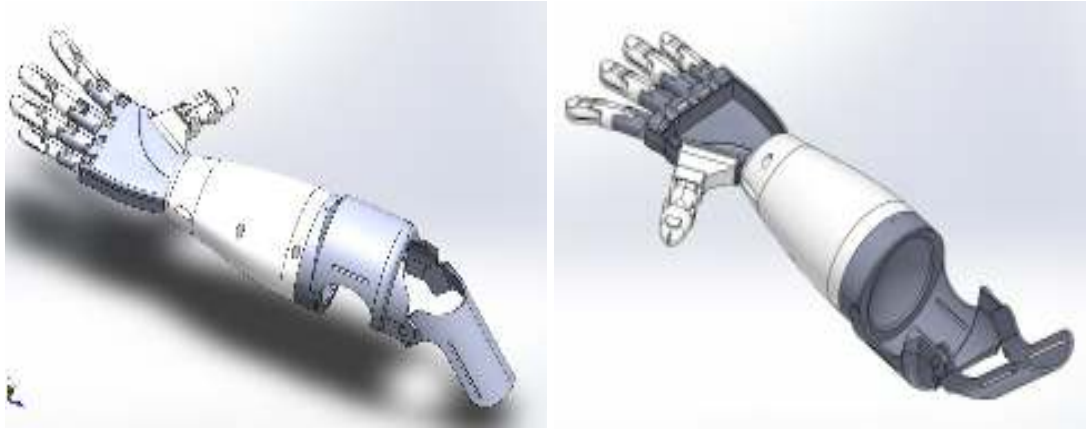
La función del acople es sujetar la prótesis con el muñón de la paciente y está compuesto por dos componentes como se detalla en la Tabla 15-3.

**Tabla 15-3.** Diseño del acople

Componente	Imagen	Proceso de diseño	Especificación
Acople antebrazo bicep		<p>Croquis: 32</p> <p>Corte: 16</p> <p>Redondeo: 4</p> <p>Extrusión: 10</p> <p>Barrido: 1</p> <p>Espesor: 1</p>	<p>Peso = 128,26 g</p> <p>Longitud = 114,5 mm</p> <p>Material = PLA</p>
Acople bicep		<p>Croquis: 32</p> <p>Corte: 16</p> <p>Redondeo: 4</p> <p>Extrusión: 10</p> <p>Barrido: 1</p> <p>Espesor: 1</p>	<p>Peso = 43,43 g</p> <p>Longitud = 180 mm</p> <p>Material = PLA</p>

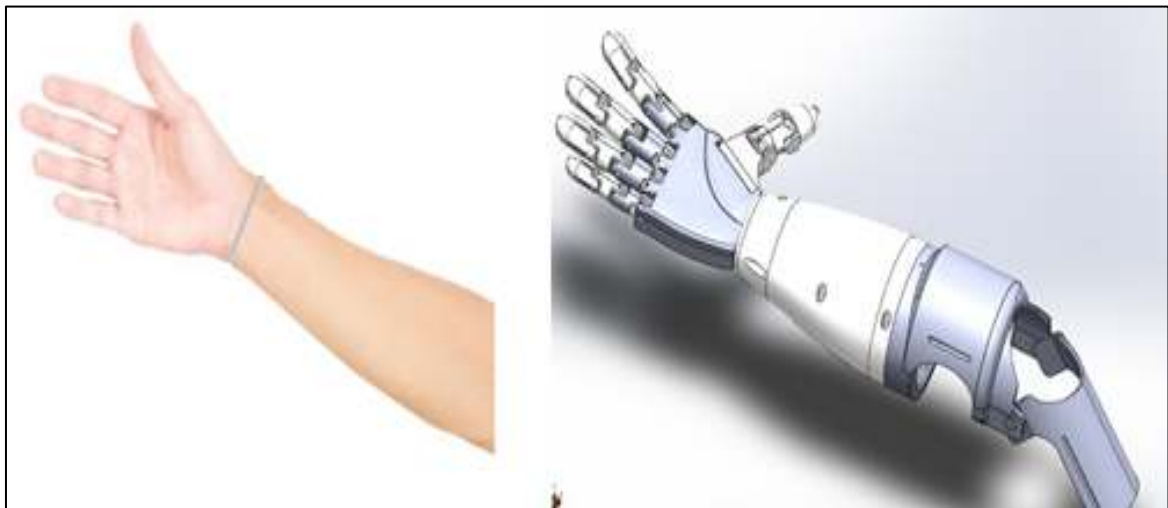
Realizado por: Estrada Omar, 2020

Una vez finalizado el diseño de todos los componentes se ensambla la prótesis (Ver figura 20-3). El modelo se asemeja a la anatomía del brazo y mano derecha humana aunque no se obtiene exactamente el contorno curvilíneo que posee ni su textura.



**Figura 21-3.** Modelo CAD de la prótesis

Realizado por: Estrada Omar, 2020



**Figura 22-3.** Modelo CAD de la prótesis

Realizado por: Estrada Omar, 2020

### 3.1.8 *Análisis estático*

Mediante el análisis estático se estudia los esfuerzos cortantes que actúan sobre los componentes de la prótesis (acoples mano-dedos y acoples prótesis-muñón) mediante la evaluación de tensión, deformación y factor de seguridad.

### 3.1.8.1 Creación del material PLA en Solidworks

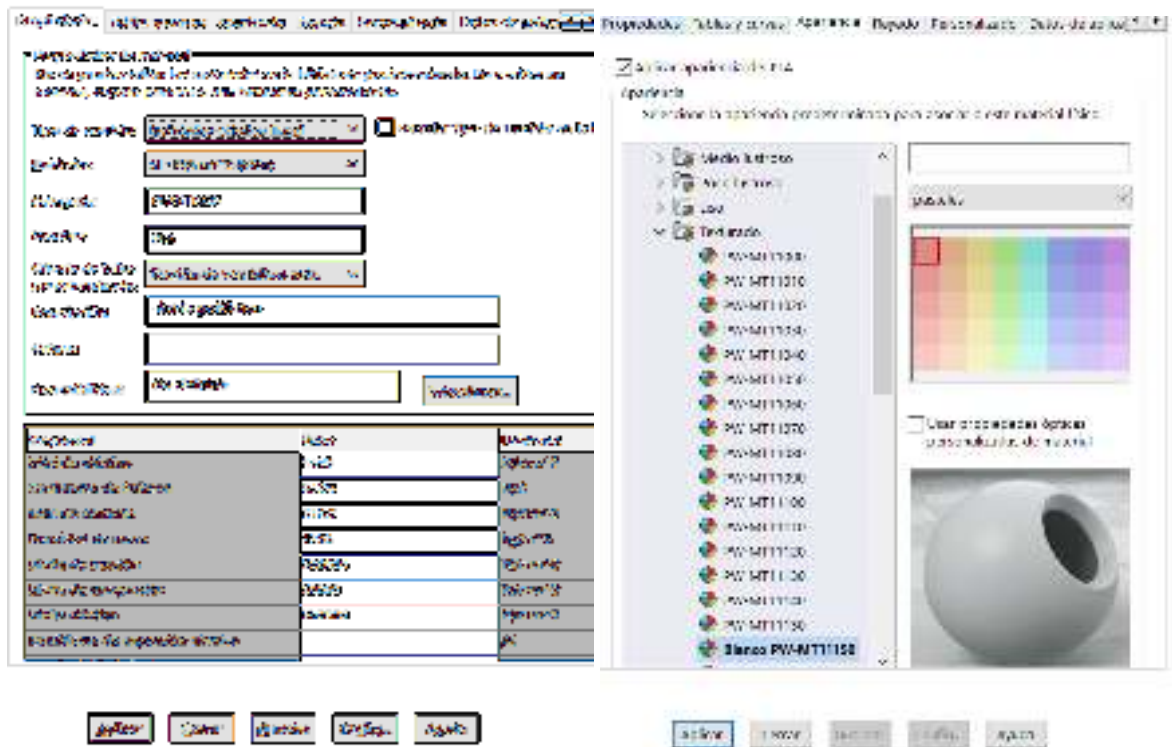
El software Solidworks por defecto no cuenta con el material PLA, por tal motivo se procede a su creación. Para ello es necesario contar con las características del material que se detallan en la Tabla 14-3.

**Tabla 16-3.** Características del PLA

Propiedades	Valor
Densidad	1210 – 1250 Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Young	3,45 – 3,83 GPa
Módulo de flexión	2,3 – 4,9 GPa
Límite elástico	48 – 60 MPa
Resistencia a tracción	48 – 60 MPa
Resistencia a compresión	48 – 60 MPa
Elongación	5 – 7 %
Dureza Vickers	14 – 18 HV
Temperatura de fusión	160-177 °C
Temperatura de transición	56 – 58 °C
Temperatura máxima de servicio	70 – 80 °C

Fuente: Filamentun, 2013

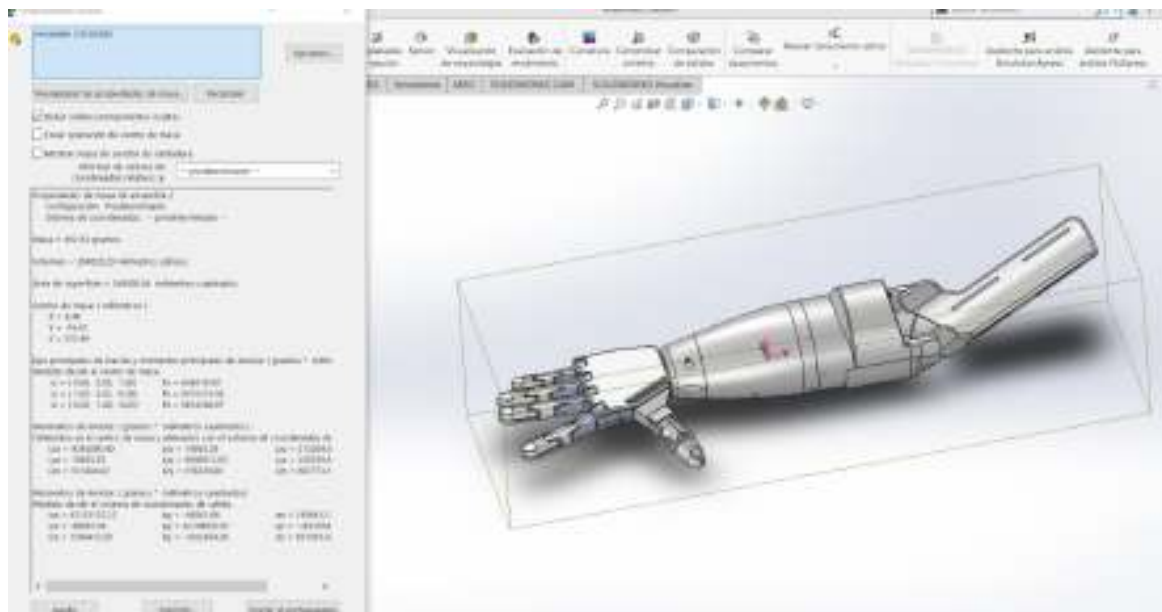
Las características del material PLA detalladas en la tabla anterior se ingresan en la base de datos del software Solidworks, en la categoría *Plásticos* ya que se trata de un ácido poliláctico (Ver Figura 20-3).



**Figura 23-3.** Creación del material PLA

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Una vez creado el material se lo puede aplicar en el modelo CAD de la prótesis a fin de conocer sus propiedades físicas o realizar un análisis estático (Ver figura 21-3).



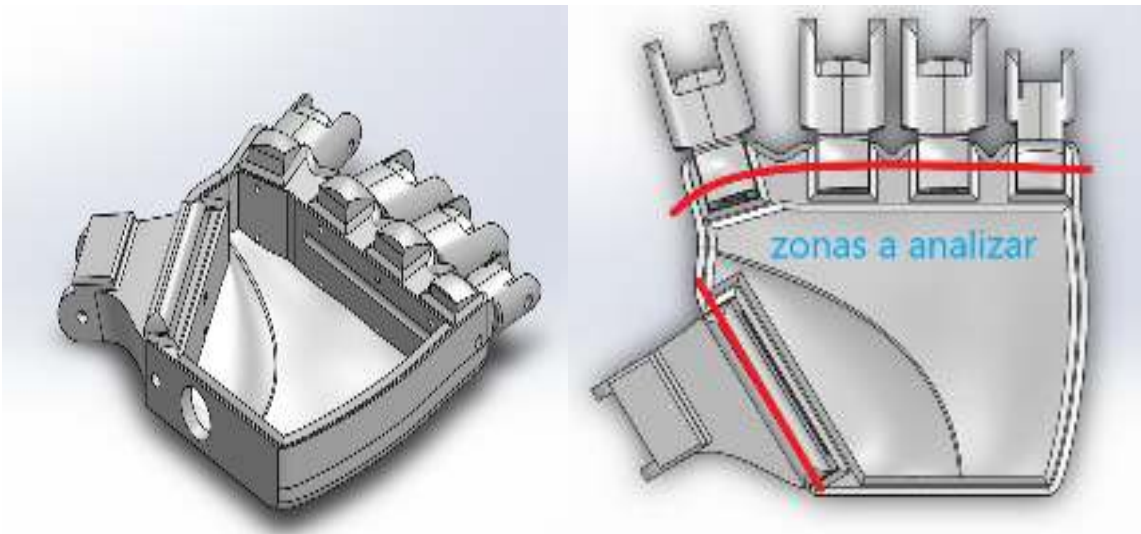
**Figura 24-3.** Aplicación del material PLA

Realizado por: Estrada Omar, 2020

3.1.8.2 *Análisis Estático – Pasadores*

El acople de la palma de la mano con los falanges proximales se realiza mediante pasadores. Es necesario que estos elementos soporten los esfuerzos cortantes generados por el movimiento de los dedos, es por ello que a través del análisis estático se determina la presión máxima que soporta, cuál será su deformación ante determinado esfuerzo y su factor de seguridad.

Los pasadores están distribuidos en el contorno de la palma de la mano como se muestra en la Figura 22-3 en la cual se delimita la zona en la cual se realizará el análisis estático.




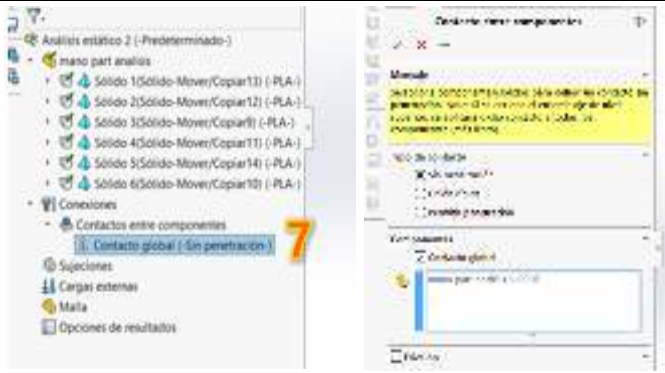
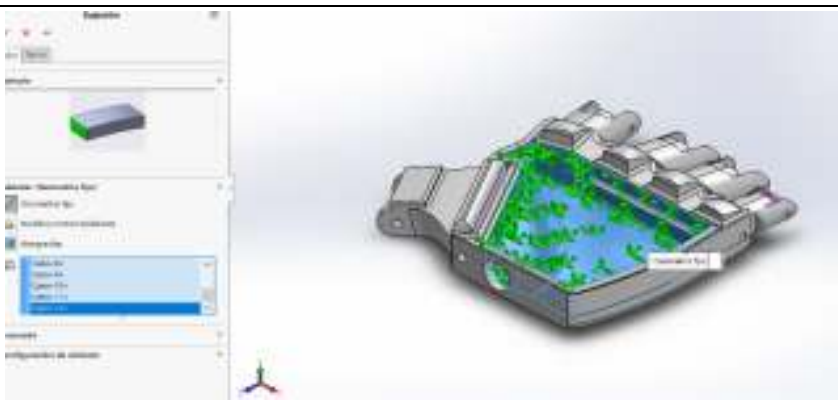

**Figura 25-3.** Zonas a analizar en el análisis estático de la palma de la mano  
Realizado por: Estrada Omar, 2020

El procedimiento para realizar el análisis estático se detalla en la Tabla 15-3.

**Tabla 17-3.** Procedimiento para realizar el análisis estático

Procedimiento	Imagen
Clic en la opción <i>Simulación y Nuevo estudio.</i>	

**Tabla 17-3 (Continua).** Procedimiento para realizar el análisis estático

<p>Seleccionar la opción <i>Análisis estático</i> y el tipo de material.</p>	
<p>Seleccionar la opción <i>Contacto global</i>.</p>	
<p>Seleccionar las caras de la geometría.</p>	
<p>Ejecutar el análisis estático.</p>	

Realizado por: Omar Estrada, 2019



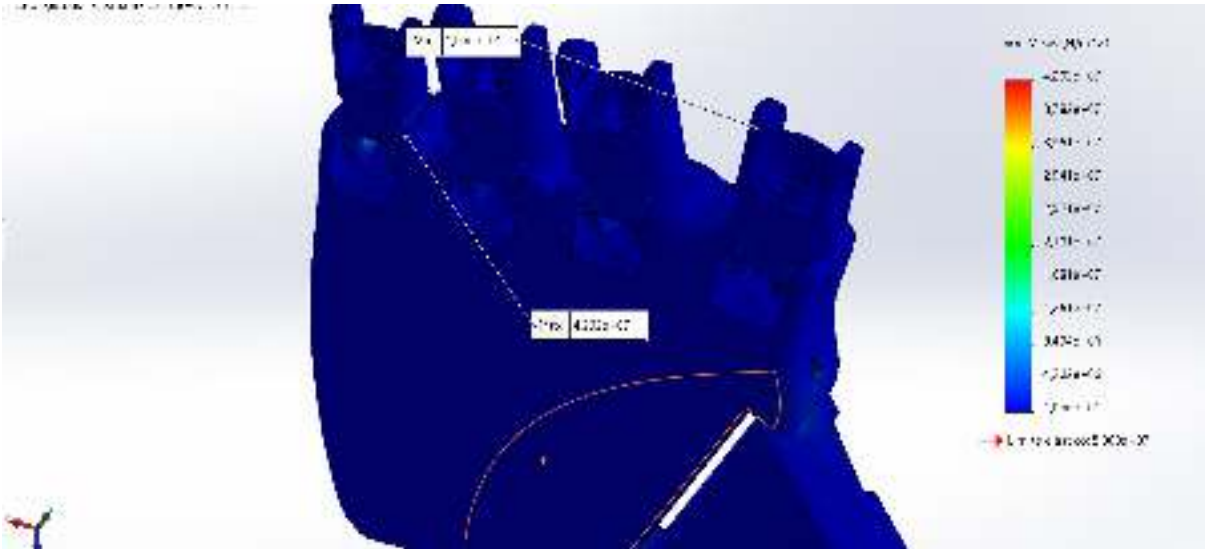
Para realizar el análisis estático se aplica una carga variable de 1, 22, 44 y 55 Newtons. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 15-3.

**Tabla 18-3.** Procedimiento para realizar el análisis estático

Análisis	Cargas aplicadas			
	1 N	22 N	44 N	55 N
Tensión	Max = $6,37 \times 10^5$ MPa Min = $1,6 \times 10^{-1}$ MPa	Max = $1,41 \times 10^7$ MPa Min = 3,21 MPa	Max = $2,81 \times 10^7$ MPa Min = 7 MPa	Max = $4,02 \times 10^7$ MPa Min = 10,5 MPa
Deformación	Max = $6,74 \times 10^{-3}$ MPa Min = $1 \times 10^{-30}$ MPa	Max = $1,48 \times 10^{-1}$ MPa Min = $1 \times 10^{-30}$ MPa	Max = $2,96 \times 10^{-1}$ MPa Min = $1 \times 10^{-30}$ MPa	Max = $4,45 \times 10^{-1}$ MPa Min = $1 \times 10^{-30}$ MPa
Factor de seguridad	Max = $2,95 \times 10^8$ Min = $6,83 \times 10^1$	Max= $1,34 \times 10^7$ Min = 3,09	Max= $6,71 \times 10^6$ Min = 1,54	Max= $4,47 \times 10^6$ Min = 1,031

Realizado por: Omar Estrada, 2019

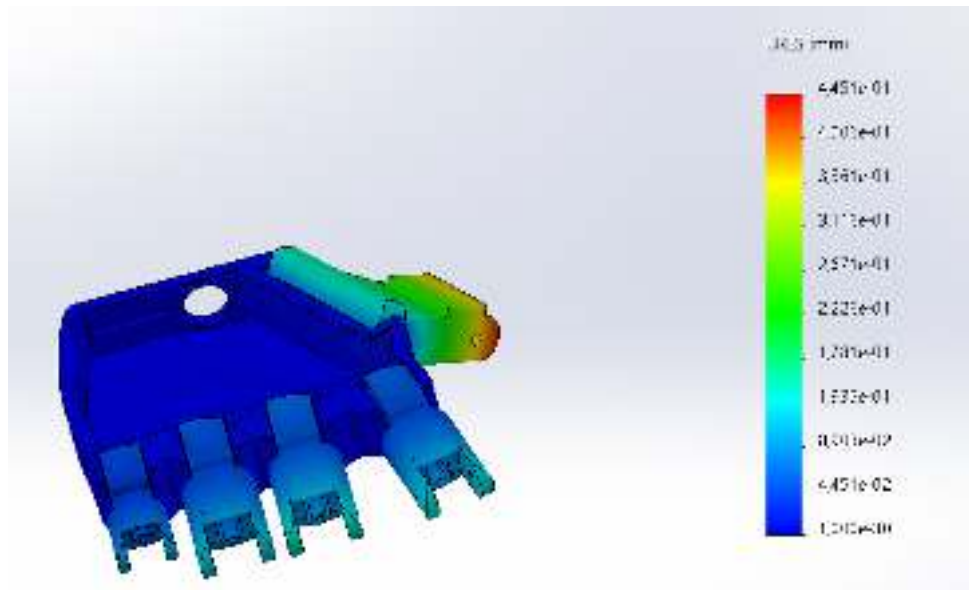
A continuación, se describe los resultados obtenidos en el análisis estático empleando la fuerza de 55 Newton (El resto de resultados se pueden visualizar en el Anexo B). Según la Figura 23-3 la fuerza de 55 N ejerce una presión mínima de 10,5 MPa en toda la palma de la mano que corresponde al pintado azul y una presión máxima de  $4,2 \times 10^7$  MPa en el contorno pintado de rojo.



**Figura 26-3.** Análisis estático (Tensiones)

Realizado por: Estrada Omar, 2020

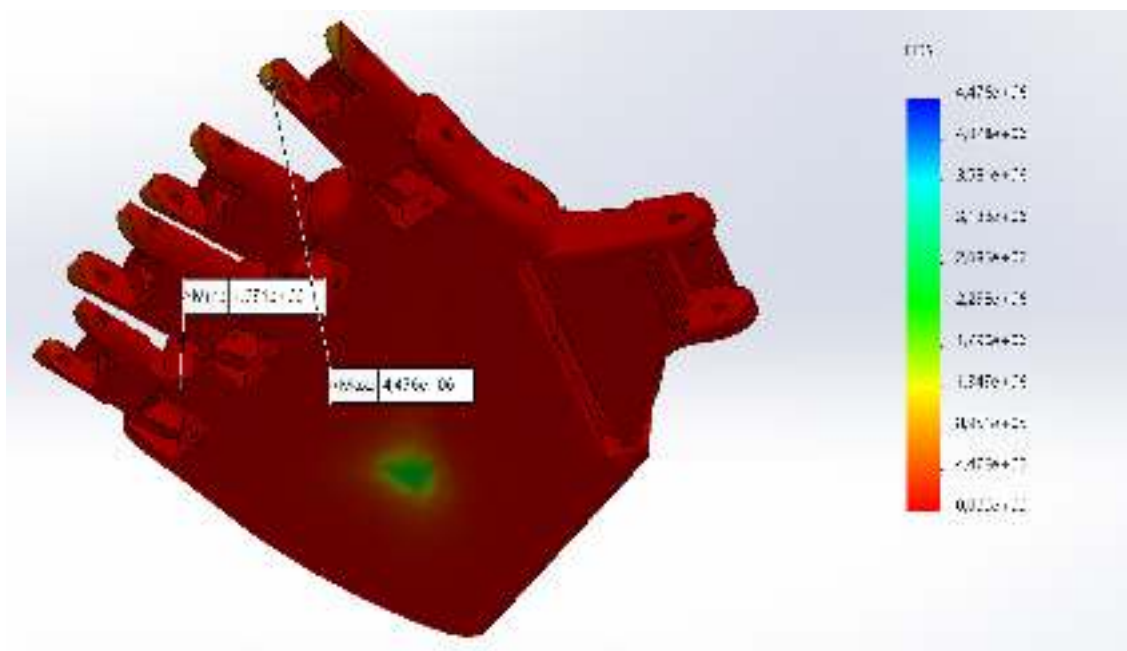
La presión ejercida genera una deformación en el modelo, como se puede observar en la Figura 24-3. La máxima deformación se produce en la parte superior de la falange proximal del dedo pulgar con un valor 0,4451 mm. En las zonas donde se localizan los pasadores se genera una deformación de 0,13 mm. Los valores mencionados son imperceptibles al ojo humano.



**Figura 27-3.** Análisis estático (Deformaciones)

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Finalmente se determina el factor de seguridad que debe ser mayor que uno para obtener una estructura de la prótesis segura y resistente ante las cargas ejercidas. Como se puede observar en la figura 25-3 el factor mínimo es igual a 1,031.



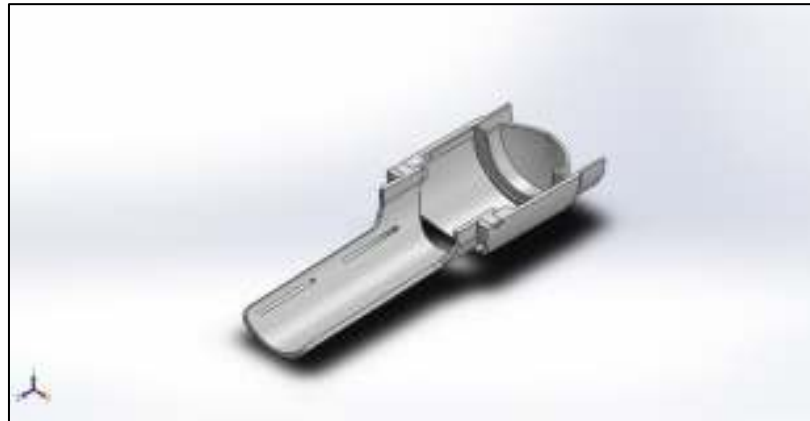
**Figura 28-3.** Análisis estático (Factor de seguridad)

Realizado por: Estrada Omar, 2020



### 3.1.8.3 Análisis Estático – Acople antebrazo

El modelo CAD del acople del antebrazo se carga en el software para realizar el análisis estático. (Ver figura 29-3)




**Figura 29-3.** Modelo antebrazo, análisis estático

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Se selecciona el tipo de material y el software nos despliega una lista de sus propiedades como se detalla en la Tabla 19-3.


**Tabla 19-3.** Procedimiento para realizar el análisis estático

Referencia de modelo	Propiedades		Componentes
	<b>Nombre:</b>	PLA	Sólido
	<b>Tipo de modelo:</b>	Isotrópico elástico lineal	1(Combinar6)(análisis 3), Sólido
	<b>Criterio de error predeterminado:</b>	Tensión de von Mises máx.	2(Combinar7)(analisis 3)
	<b>Límite elástico:</b>	5e+11 N/m <sup>2</sup>	
	<b>Límite de tracción:</b>	5e+11 N/m <sup>2</sup>	
	<b>Límite de compresión:</b>	5e+10 N/m <sup>2</sup>	
	<b>Módulo elástico:</b>	3,45e+09 N/m <sup>2</sup>	
	<b>Coefficiente de Poisson:</b>	0,394	
	<b>Densidad:</b>	1.250 kg/m <sup>3</sup>	
	<b>Módulo cortante:</b>	3,189e+08 /m <sup>2</sup>	

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Se asigna la carga de 2.5 Newton para realizar el análisis estático. Y se localiza la zona del modelo en el que va a actuar la fuerza asignada. (Ver Tabla 20-3).

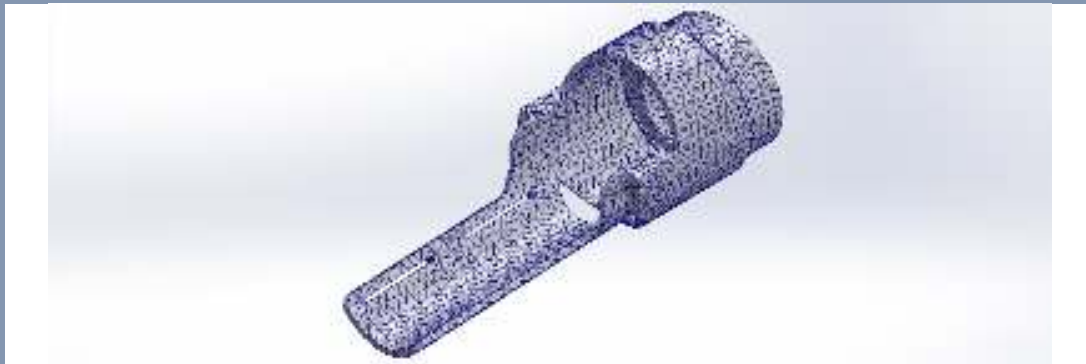
**Tabla 20-3.** Procedimiento para realizar el análisis estático

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<b>Entidades:</b>	1 cara(s)	
		<b>Tipo:</b>	Geometría fija	
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-5,96046e-06	-2,5	1,93119e-05	2,5

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Se realiza el mallado del modelo, para subdividirlo en una red de elementos y nodos necesarios para realizar la simulación del análisis estático. (Ver Tabla 21-3).

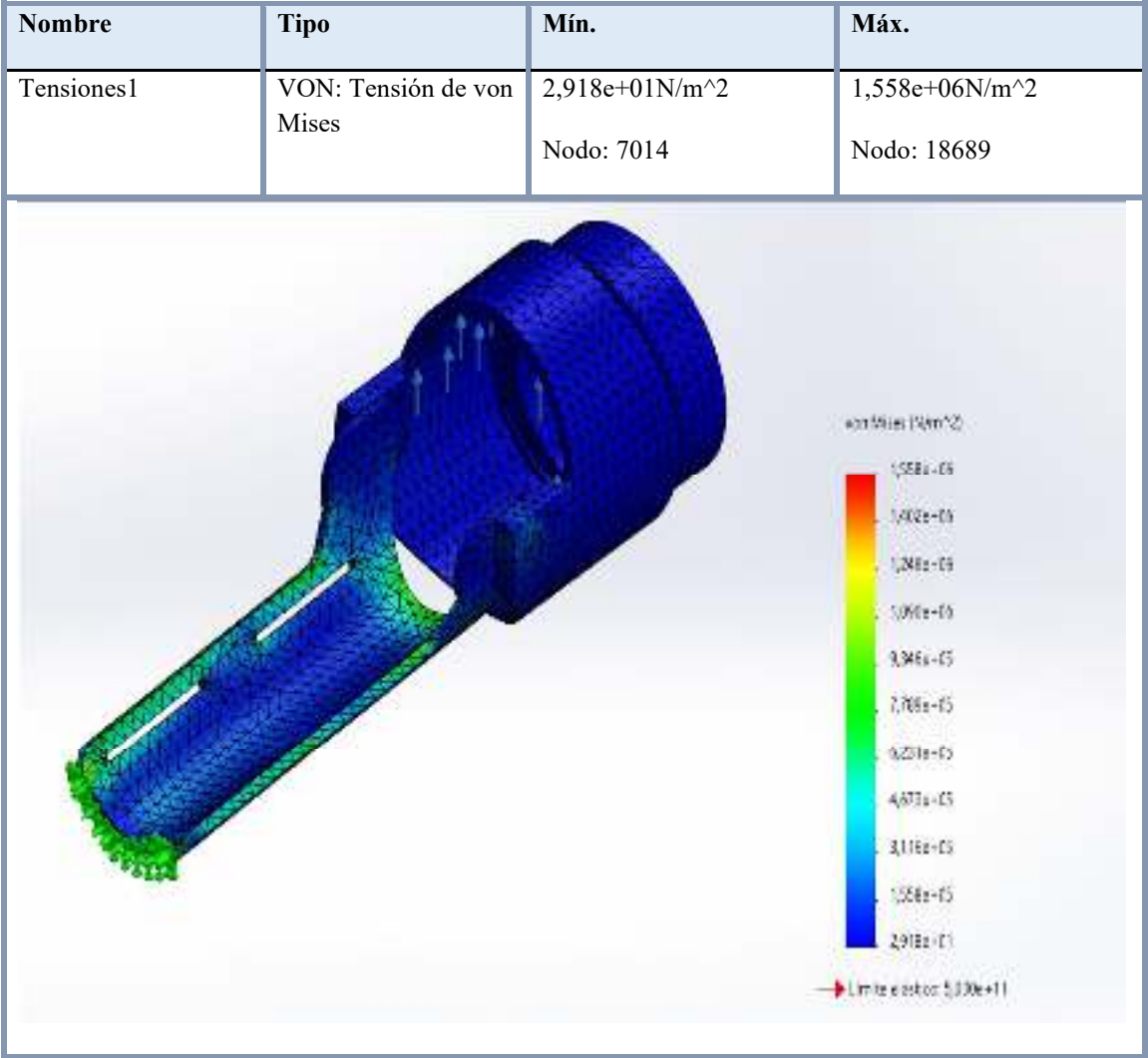
**Tabla 21-3.** Procedimiento para realizar el análisis estático

Número total de nodos	25877
Número total de elementos	12877
Cociente máximo de aspecto	52,617
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	80,9
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0,342
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:08
	

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Generada la malla del modelo, se procede a realizar el análisis estático y los resultados se detallan a continuación. La fuerza de 2.5 N ejerce una presión mínima de 29,1 MPa en la superficie pintada de azul y una presión aproximada de  $9,34 \times 10^5$  MPa en el área donde se aplicó la fuerza y en los contornos del acople (Ver tabla 22-3).

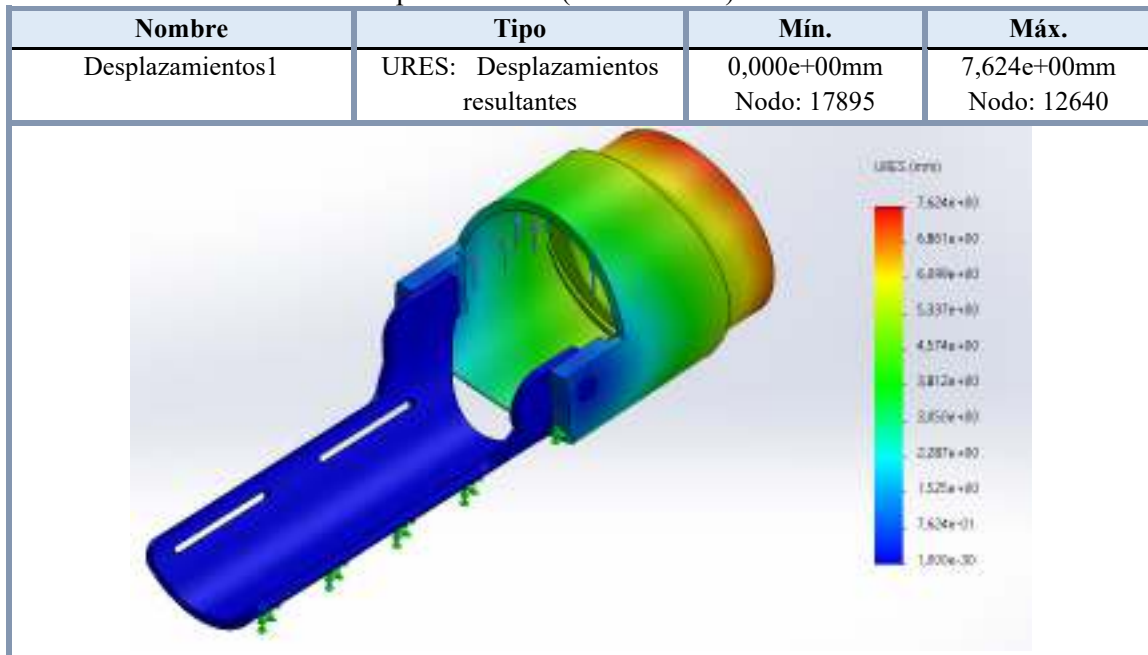
**Tabla 22-3.** Análisis estático acople antebrazo (Tensiones)



**Realizado por:** Estrada Omar, 2020

La deformación máxima que genera la presión, como se puede observar en la Tabla 21-3 es de 7,62 mm y se genera en la parte superior del acople donde se localiza el muñón. El acople del antebrazo tiene una deformación mínima de  $1 \times 10^{-30}$  mm por lo que imperceptible al ojo humano; la presión tiene un impacto mayor en el acople de la prótesis al bicep.

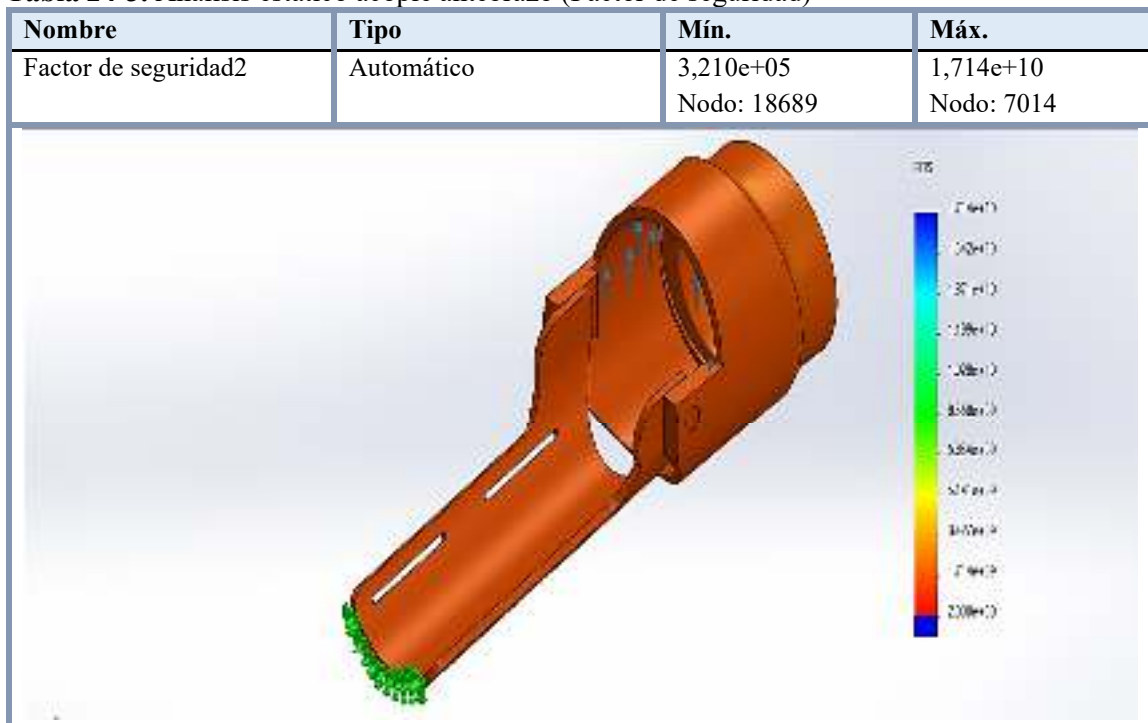
**Tabla 23-3.** Análisis estático acople antebrazo (Deformación)



Realizado por: Estrada Omar, 2020

Finalmente se determina un factor de seguridad mínimo de  $3,2 \times 10^5$  por lo que se concluye que la estructura del acople del antebrazo es segura y resistente a la carga ejercida.

**Tabla 24-3.** Análisis estático acople antebrazo (Factor de seguridad)



Realizado por: Estrada Omar, 2020

En el Anexo C, se detalla el análisis estático del acople del bíceps. De igual manera se obtuvo un factor de seguridad mayor que uno por lo que se determinó que el diseño es seguro y resistente a las cargas que se generan en el componente.

## 3.2 CONTRUCCIÓN DE LA PRÓTESIS

Esta sección comprende la etapa de ensamblado y armado de la prótesis, es decir, la transformación del modelo CAD a un modelo físico mediante el proceso de impresión 3D. El material seleccionado es el PLA debido a su peso ligero, costo moderado, material biodegradable, alta resistencia mecánica, entre otras características.

### 3.2.1 Impresora 3D

En el mercado existe una variedad de impresoras 3D, las más utilizadas son: las impresoras 3D cartesianas y las impresoras 3D delta. Es por ello que a continuación se realiza una comparación de las características más importantes de cada tipo a fin de seleccionar la mejor alternativa para la impresión de la prótesis. El análisis de la mejor alternativa se realiza en base a los factores que se deben considerar para realizar una impresión 3D que reúna las características que requiere la prótesis ergonómica.

**Tabla 25-3.** Tipo de impresora

Impresora		Criterios de valorización				
		Materiales de impresión	Sistema de impresión	Costo (Dólares)	Volumen de impresión (cm <sup>3</sup> )	Velocidad de impresión (mm/s)
A	Impresora delta (Rostock) 	PLA	FDM	730,00	Ø150 × 180	150
B	Impresora cartesiana (Witbox) 	PLA	FDM	1690,00	297 x 210 x 200	80

Realizado por: Estrada Omar, 2020

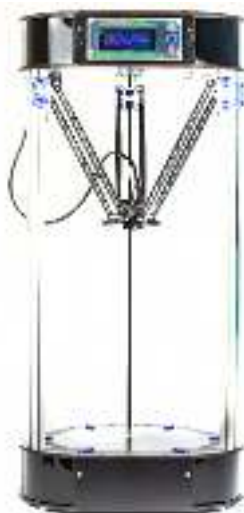
El material de impresión de ambas impresoras es el PLA, el sistema de impresión también es el mismo y es el FDM (funde el material por capas). Aquella alternativa de menor costo se evalúa con mayor calificación. En cuanto al volumen de impresión, se debe tomar en cuenta que se obtengan las dimensiones de los componentes de la prótesis. El proceso para la selección se detalla a continuación.

**Tabla 26-3.** Evaluación de alternativas, tipos de impresora

Factor	Peso	Alternativa	
		A	B
Material de impresión	9	5 45	5 45
Sistema de impresión	7	5 35	5 35
Costo	8	5 40	3 24
Volumen de impresión	8	5 40	4 32
Velocidad de impresión	9	5 45	3 27
Total		205	163

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Como resultado de la evaluación se determinó que A constituye la mejor alternativa y corresponde a la impresora delta ya que sus características de costo y velocidad de impresión sobresalen sobre las características de la impresora cartesiana.

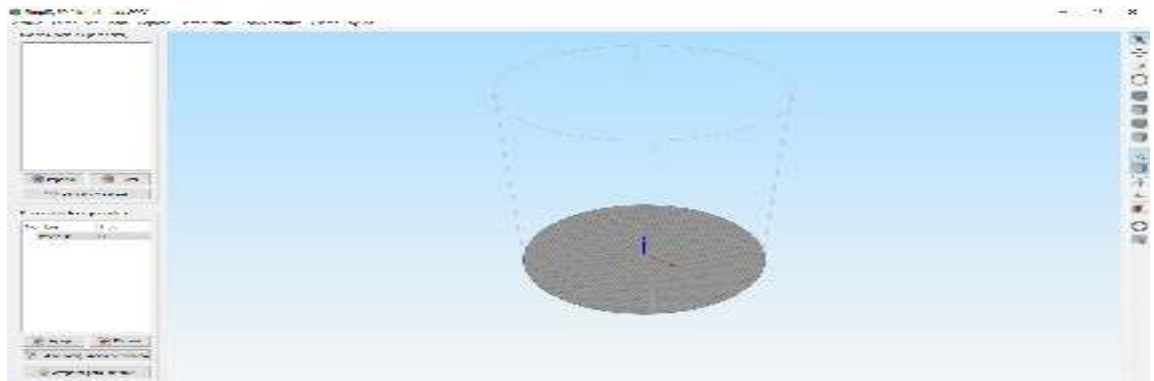


**Figura 30-3.** Impresora Rostock Max V3

Fuente: <https://3dfactory.mx/producto/rostock-max-delta/>

### 3.2.2 Proceso de impresión 3D

El proceso de impresión 3D consiste en cargar los modelos CAD diseñados al software Simplify 3D para transferir la imagen a un sistema de coordenadas tridimensional y al language de programa de códigos G que controla las posiciones exactas de donde se debe localizar el PLA en diversas capas superpuestas unas de otras hasta obtener los modelos físicos de los componentes de la prótesis diseñados.

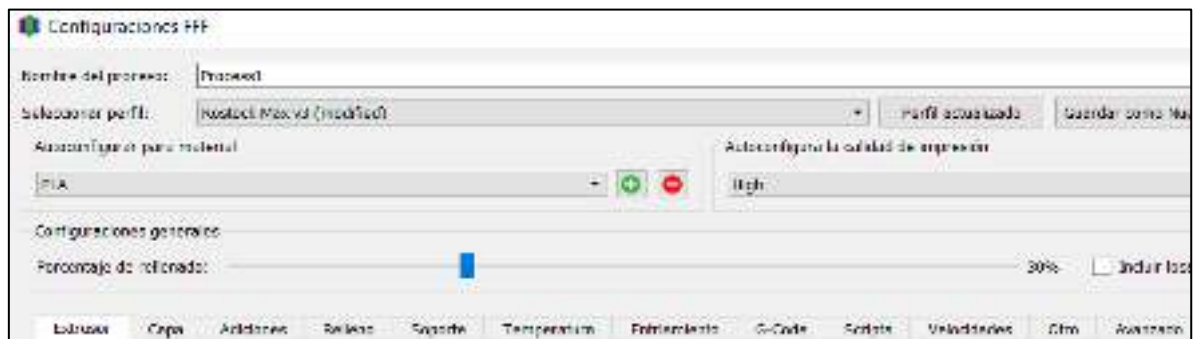


**Figura 31-3.** Simplify 3D

Realizado por: Estrada Omar, 2020

#### 3.2.2.1 Configuración de la impresora

Previo al proceso de impresión se debe configurar la impresora, para lo cual se debe seleccionar el material y posteriormente editar las siguientes opciones: Extrusor, Capa, Adiciones, Relleno, Soporte, Temperatura, Enfriamiento, G-code, Scripts y Velocidades. (Ver Figura 32-3)


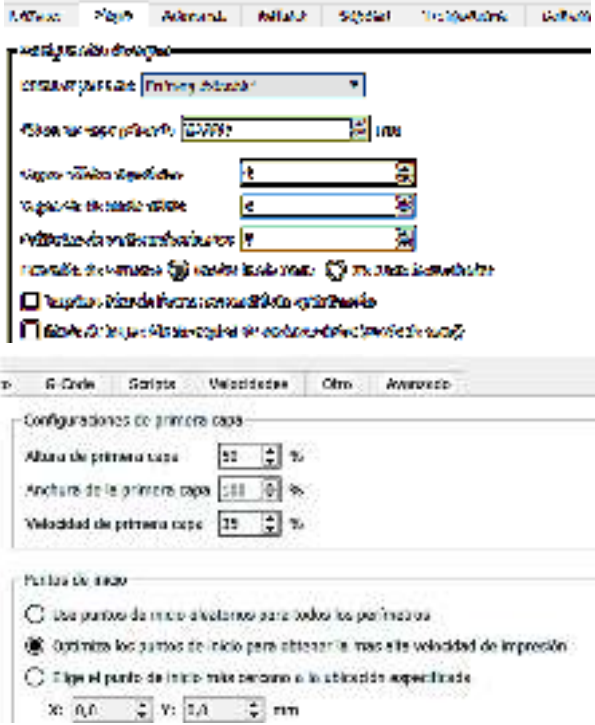
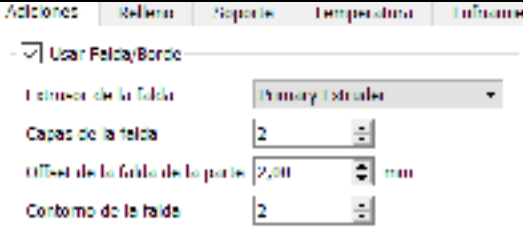


**Figura 32-3.** Configuración de la impresora

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Cabe mencionar que los valores que se ingresan en cada configuración que se detalla en la Tabla 27-3 son el resultado de la experiencia del diseñador

**Tabla 27-3.** Configuración de la impresora

Procedimiento	Imagen
Configuraciones del extrusor	
Configuraciones por capa	
Adiciones	



**Tabla 27-3 (Continua).** Configuración de la impresora

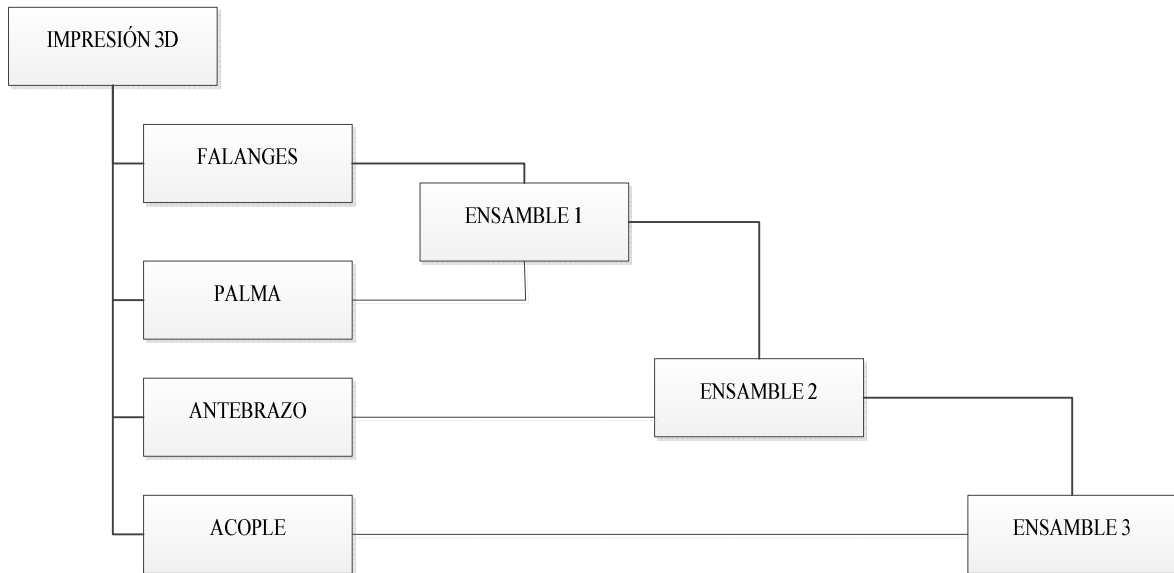
	<div> <div> <div>mes</div> <div>Relleno</div> <div>Reporte</div> <div>Temperatura</div> <div>Enfriamiento</div> <div>6i Code</div> <div>Script</div> <div>Verticalidad</div> <div>Uso</div> </div> <div> <div> <div>General</div> <div> <div>Extrusor de relleno: Primary Extruder</div> <div>Patrón de relleno interno: Fast Honeycomb</div> <div>Patrón de relleno externo: Reducción</div> <div>Porcentaje de llenado interior: 30 %</div> <div>Superposición de contorno: 40 %</div> <div>Ancho de la extrusión de relleno: 150 %</div> <div>Longitud de relleno mínima: 0,10 mm</div> <div>Combine el relleno cada: 1 capas</div> <div> <input type="checkbox"/> Incluye un diafragma sólido cada 20 capas </div> </div> <div> <div>Desplazamientos del ángulo de inserción interna</div> <div> <div>0 grad</div> <div>0</div> <div>Agregar ángulo</div> <div>Quitar ángulo</div> </div> <div> <input type="checkbox"/> Imprime cada ángulo de relleno en cada capa </div> <div>Compensaciones de ángulo de entrada externas</div> <div> <div>0 grad</div> <div>45</div> <div>Agregar ángulo</div> <div>Quitar ángulo</div> </div> </div> </div> </div> </div>																								
Temperatura	<div> <div>Build Plate temperatura</div> <div> <div>Vista general</div> <div> <div>Identificador de temperatura: 13</div> <div> <div>Tipo de controlador de temperatura: <input checked="" type="radio"/> Feltres <input type="radio"/> Metaforma caliente </div> <div> <div>Monitorea la temperatura cada: <input type="checkbox"/> Capa <input type="checkbox"/> Vuelta </div> <div> <input checked="" type="checkbox"/> Espera a que el controlador de temperatura se estabilice antes de comenzar la construcción </div> </div> <div> <div>Puntos de referencia de temperatura por capa</div> <table> <tr> <th>Capa</th><th>Temperatura</th></tr> <tr> <td>1</td><td>60</td></tr> </table> <div> <div>Agregar punto de referencia</div> <div>Quitar un punto de referencia</div> <div>Número de capa: 1</div> <div>Temperatura: 200 °C</div> </div> </div> </div> </div> </div></div>	Capa	Temperatura	1	60																				
Capa	Temperatura																								
1	60																								
Enfriamiento	<div> <div>Controlador de enfriamiento por capa</div> <table> <tr> <th>Capa</th><th>Velocidad de ventilador</th></tr> <tr> <td>1</td><td>60</td></tr> <tr> <td>10</td><td>30</td></tr> <tr> <td>20</td><td>30</td></tr> <tr> <td>30</td><td>30</td></tr> <tr> <td>40</td><td>30</td></tr> <tr> <td>50</td><td>30</td></tr> <tr> <td>60</td><td>30</td></tr> <tr> <td>70</td><td>30</td></tr> <tr> <td>80</td><td>30</td></tr> <tr> <td>90</td><td>30</td></tr> <tr> <td>100</td><td>30</td></tr> </table> <div> <div>Agregar punto de referencia</div> <div>Quitar un punto de referencia</div> <div>Referencia de capa: 1</div> <div>Velocidad de ventilador: 30</div> </div> </div> <div> <div>Temperatura de ventilador</div> <div> <input checked="" type="checkbox"/> Mantener un punto de referencia de temperatura del controlador de ventilador en todo momento durante la construcción </div> </div> <div> <div>Controlador de enfriamiento</div> <div> <input checked="" type="checkbox"/> Mantener la velocidad del ventilador por debajo de 100% </div> <div> <div>Máximo velocidad de ventilador durante la construcción: 100 %</div> <div>Máximo velocidad de ventilador durante el enfriamiento: 100 %</div> <div> <input checked="" type="checkbox"/> Controlar la velocidad de ventilador durante el enfriamiento </div> </div> </div>	Capa	Velocidad de ventilador	1	60	10	30	20	30	30	30	40	30	50	30	60	30	70	30	80	30	90	30	100	30
Capa	Velocidad de ventilador																								
1	60																								
10	30																								
20	30																								
30	30																								
40	30																								
50	30																								
60	30																								
70	30																								
80	30																								
90	30																								
100	30																								

**Tabla 27-3 (Continúa). Configuración de la impresora**[illegible]

Realizado por: Estrada Omar, 2020

#### 3.2.2.2 Impresión de los componentes

La impresión de cada componente requiere de la experticia del diseñador en cuanto al manejo y calibración de la impresora para la obtención del resultado deseado. El proceso de impresión sigue la misma secuencia del modelado CAD.



**Gráfico 6-3.** Proceso de impresión 3D

**Realizado por:** Estrada Omar, 2020

- **Preparación de la impresora:** Previo a la impresión se debe preparar la impresora para que imprima adecuadamente; el diseñador debe verificar que las conexiones se encuentren debidamente conectadas.

Después se debe preparar la cama de impresión que es la superficie sobre la cual se formarán las capas de material hasta obtener el modelo deseado. La cama debe localizarse a la debida distancia respecto a la boquilla del cabezal. Esta distancia debe ser igual a la altura de capa que se haya escogido.

La temperatura de la impresión es la primera variable a tomar en cuenta al comenzar el proceso, Para imprimir nuestro modelo 3D debemos poner a calentar a la debida temperatura tanto el extrusor como la plataforma Hay tres casos esenciales en los que debemos calentar el extrusor: Para poner filamento en la impresora, para quitar filamento de la impresora y para imprimir o extruir. La temperatura depende del material que se utiliza para imprimir.

Colocación del filamento PLA en la impresora, se lo realiza una vez que se haya calentado adecuadamente la impresora.



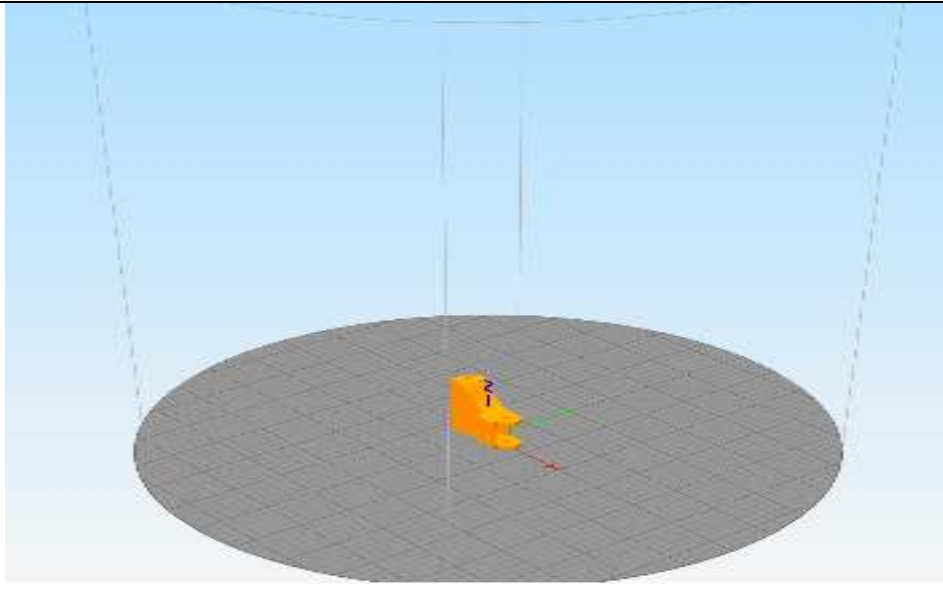
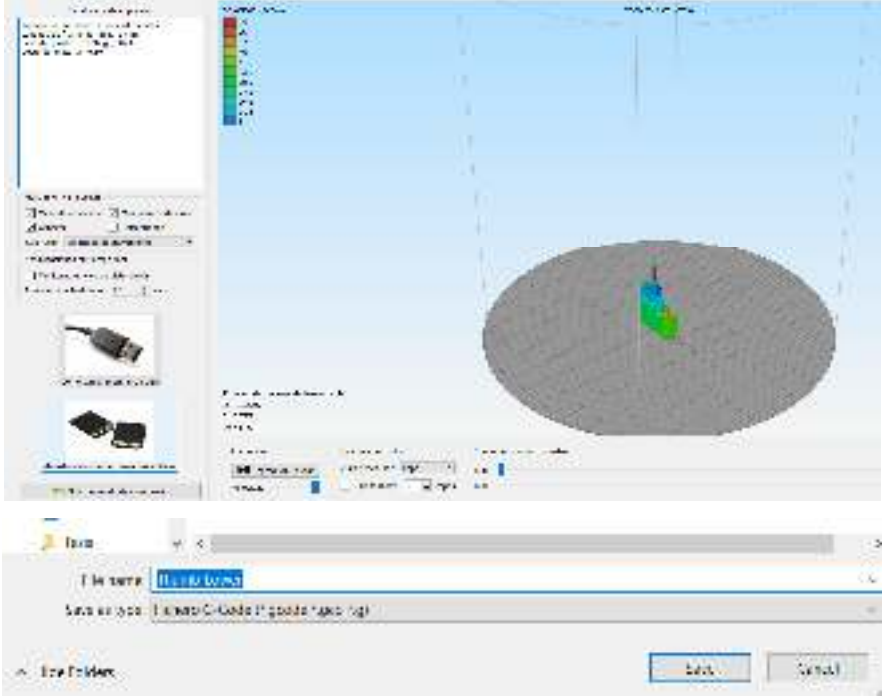
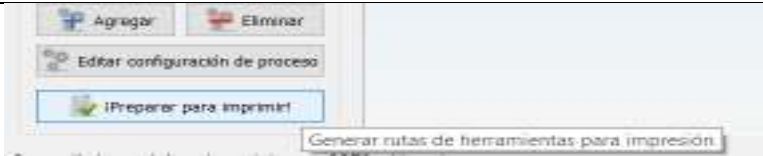
**Figura 33-3.** Preparación de la impresora  
Realizado por: Estrada Omar, 2020

- Una vez completada la etapa de preparación se procede a imprimir cada componente siguiendo el proceso descrito en la Tabla 28-3.

**Tabla 28-3.** Proceso de impresión 3D

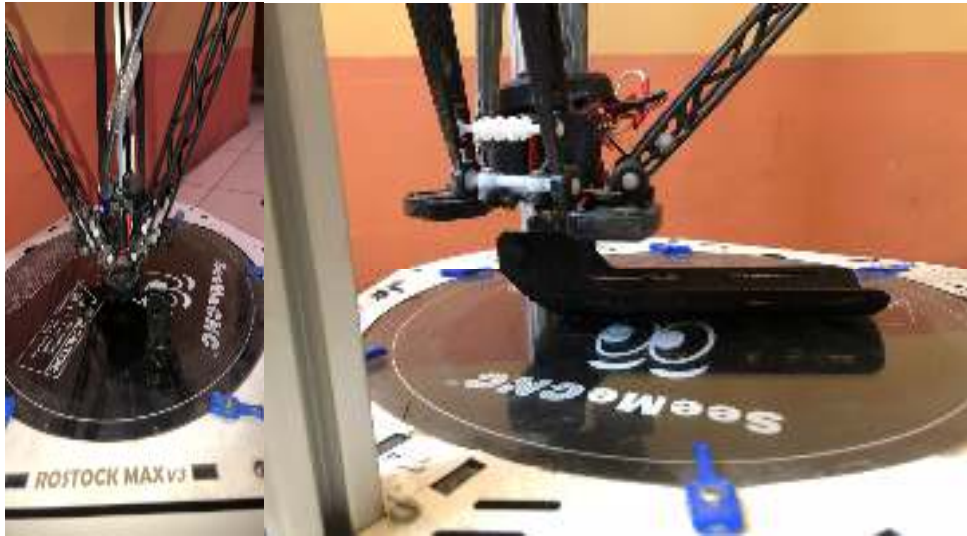
Procedimiento	Imagen
Obtención del formato STL	
Importar el modelo a imprimir	

**Tabla 28-3 (Continua).** Proceso de impresión 3D

<p>Seleccionar el modelo</p>	
<p>Generar G-code</p>	
<p>Clic en imprimir</p>	

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Una vez finalizado el proceso se ejecuta la impresión de los componentes. (Ver figura 31-3).



**Figura 34-3.** Preparación de la impresora

Realizado por: Estrada Omar, 2020

- Primero se imprimen las falanges de cada dedo y se las ensambla mediante pines, formando así cada dedo de la mano. (Ver figura 32-3).



**Figura 35-3.** Preparación de la impresora

Realizado por: Estrada Omar, 2020

- Una vez impresos los dedos, se imprime la palma de la mano. (Ver figura 33-3).





**Figura 36-3.** Preparación de la impresora

Realizado por: Estrada Omar, 2020

- Posteriormente se ensambla la mano con los dedos, de igual manera utilizando pines se une la base de la falange proximal de cada dedo con el acople la palma de la mano. (Ver figura 34-3).



**Figura 37-3.** Preparación de la impresora

Realizado por: Estrada Omar, 2020

- **Acoplamiento mecánico:** Es el encargado de efectuar el movimiento en la prótesis mediante servomotores y cables conductores (hilo nylon). Por cada dedo de la mano se introduce dos hilos

para el cierre y la apertura de los mismos (Ver figura 35-3), las propiedades mecánicas del nylon se detallan en la Tabla 29-3.

**Tabla 29-3.** Características del Nylon

Propiedades	Valores
Resistencia a la tracción	76 MPa
Gravedad específica	1.13
Alargamiento de rotura	60%
Resistencia a la flexión	110 MPa
Temperatura de fusión	220°C
Temperatura máxima de uso continuo	150°C a 185°C
Dureza Rockwell	M80

**Fuente:** <https://descubrearduino.com/nylon-impresion-3d/>



**Figura 38-3.** Preparación de la impresora  
Realizado por: Estrada Omar, 2020

Se acoplaron micro servos MG90S en el antebrazo de la prótesis. Se usaron este tipo de motores especialmente por su corto tamaño (Ver Figura 36-3 y Figura 37-3) y sus características (Ver tabla 26-3).





**Figura 39-3.** Microservo

Fuente: (Tierra, 2017)



**Figura 40-3.** Microservos montados en el antebrazo

Realizado por: Estrada Omar, 2020

**Tabla 30-3.** Características del servomotor

Características	Valores
Voltaje de operación	4.8 V a 6 V
Velocidad de operación	0.1 s/60° (4.8V) 0.08 s/60° (6V)
Torque	1-8 Kg-f.cm (4.8 V) 2.2 Kg-f.cm (6 V)
Peso ligero	13.4 g

**Fuente:** (Tierra, 2017)

- Una vez finalizada la impresión de todos los componentes se los ensambla y se obtiene la prótesis ergonómica de la Figura 40-3. De igual manera que con el modelo CAD, la impresión 3D de la prótesis se asemeja a la anatomía del brazo y mano humana aunque se nota la clara de su textura y dureza. (Ver Figura 41-3)



**Figura 41-3.** Prótesis impresa

**Realizado por:** Estrada Omar, 2020

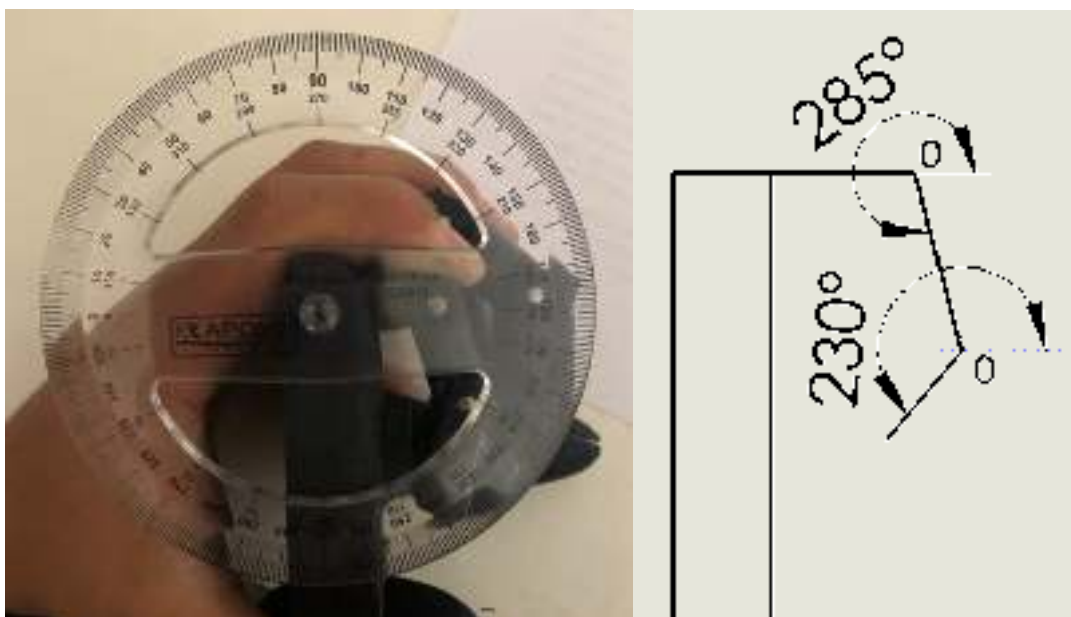


**Figura 42-3.** Prótesis impresa

Realizado por: Estrada Omar, 2020

### 3.2.2.3 Grados de libertad

Los grados de libertad son los ángulos de flexión obtenidos en los dedos de la prótesis mediante el sistema mecánico de servomotores e hilo conductor, en la figura 43-3 a modo de ejemplo se muestra la medida del ángulo de flexión de las falange proximal, medial y distal. Para la medida de los ángulos se sitúa el cero del sistema de referencia en la unión de la falange proximal-medial y en la unión de la falange medial-distal; la medida se realiza en sentido antihorario desde el eje x positivo. El proceso de medición del dedo meñique se repite para cada dedo y los resultados se detallan en la Tabla 31-3.



**Figura 43-3.** Grados de libertad, falange proximal horizontal

**Realizado por:** Estrada Omar, 2020

Los ángulos de abducción de la figura 44-3 se miden en sentido horario, para el dedo índice se parte del eje “y”, mientras que para el dedo pulgar se parte del eje “x” positivo.



**Figura 44-3.** Grados de libertad, ángulo de abducción

**Realizado por:** Estrada Omar, 2020

La muñeca gira alrededor de su propio eje en sentido horario y antihorario un ángulo de 90°. (Ver figura 45-3)



**Figura 45-3.** Rotación de la muñeca

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Una vez finalizado el proceso de medición de los ángulos se describe en la Tabla 31-3 los grados de libertad de la prótesis.

**Tabla 31-3.** Grados de libertad de la prótesis

Dedos	Ángulos de flexión – falanges		
	Proximal	Medial	Distal
<b>Meñique</b>	0°	285°	230°
<b>Anular</b>	10°	280°	230°
<b>Medio</b>	7°	278°	230°
<b>Índice</b>	0°	275°	230°
<b>Pulgar</b>	-	75°	10°
	Ángulo de abducción		
<b>Índice</b>	20°		
<b>Pulgar</b>	25°		
	Rotación		
<b>Muñeca</b>	180° (Sentido horario y antihorario)		

Realizado por: Estrada Omar, 2020

Mediante el sistema mecánico conformado por los servomotores y los hilos conductores se obtiene 15 grados de libertad en los dedos y la muñeca.



#### 3.2.2.4 Pruebas de funcionamiento

Mediante las pruebas de funcionamiento se determina el grado de cumplimiento de los parámetros de diseño establecidos inicialmente (Ver gráfico 2-3). Para evaluar cada parámetro se encuesta a la paciente y se le pregunta en una escala del 1 al 5 con que calificación evaluaría el parámetro. El resultado se detalla en la Tabla 27-3.

Previo a la evaluación se coloca con cuidado la prótesis al paciente, primero se ajusta el acople a su muñón con correas de sujeción (Ver figura 42-3) y posteriormente se ajusta la prótesis al acople. (Ver figura 43-3)



**Figura 46-3.** Ajuste del acople al muñón

Realizado por: Estrada Omar, 2020



**Figura 47-3.** Ajuste de la prótesis al acople

Realizado por: Estrada Omar, 2020

La paciente menciona que no siente ninguna molestia en la unión de la prótesis con el muñón, que el peso de la prótesis es ligero y en cuanto a las correas de sujeción sugiere apretar un poco más. Una vez hecho lo recomendado se procede a evaluar los parámetros de diseño obteniendo el siguiente resultado.

**Tabla 32-3.** Análisis prótesis

Característica	Calificación					PUNTAJE
	1 (Muy malo)	2 (Malo)	3 (Regular)	4 (Bueno)	5 (Muy bueno)	
Antropometría						3
Estética						4
Grados de libertad						4
Resistencia						4
Peso						4
<b>PROMEDIO</b>						<b>3,8</b>

Realizado por: Estrada Omar, 2020

En promedio la paciente califica a la prótesis prototipo como *buena* por lo que se concluye que se cumple con los parámetros de diseño establecidos.

**Tabla 33-3..** Análisis prótesis

Característica	Calificación					PUNTAJE
	1 (Muy malo)	2 (Malo)	3 (Regular)	4 (Bueno)	5 (Muy bueno)	
Antropometría						5
Estética						5
Grados de libertad						4
Resistencia						5
Peso						5
<b>PROMEDIO</b>						<b>4,8</b>

La prótesis final una vez hechos los arreglos requeridos por la paciente, se obtuvo una calificación de *muy buena*, lo que cumple con los parámetros de satisfacción de uso establecidos.

### 3.2.2.5 Prótesis masculina

Es importante señalar que el proceso de diseño y construcción de una prótesis masculina es el mismo que se detalla en el presente trabajo de titulación, aunque en el resultado encontraríamos ciertas diferencias lo cual se analiza en la Tabla 32-3.

**Tabla 34-3.** Prótesis masculina vs prótesis femenina

<b>Características</b>	<b>Prótesis masculina</b>	<b>Prótesis femenina</b>	<b>Observación</b>
<b>Antropometría</b>	Mayor volumen	Menor volumen	El cuerpo del hombre tiene mayor dimensión y robustez, lo cual representa una ventaja para la prótesis masculina ya que se puede utilizar un mayor número de dispositivos de control en la cavidad de la prótesis.
<b>Estética</b>	Exigencia media	Exigencia alta	Generalmente la mujer se preocupa más por la estética (belleza), mientras que al hombre más le importa que funcione. Aunque esto puede variar en cada persona sin importar su género.
<b>Grados de libertad</b>	Sistema mecánico (servomotores)	Sistema mecánico (servomotores)	Los grados de libertad se refiere a los ángulos de flexión, abducción y de giro de los componentes de la prótesis esto depende del tipo de sistema mecánico que se utilice.
<b>Resistencia</b>	Alta	Alta	La resistencia de la prótesis dependerá directamente del tipo de material de impresión.
<b>Peso</b>	Mayor peso	Menor peso	El peso de la prótesis masculina es mayor porque se requiere más cantidad de material de impresión debido a que sus dimensiones antropométricas son mayores.

Realizado por: Estrada Omar, 2020



## 4 GESTIÓN DEL PROYECTO

### 4.1 Tiempos de impresión

En la siguiente tabla se detalla los tiempos de impresión de cada componente de la prótesis.

**Tabla 1-4.** Tiempo de impresión

Tabla 1. Tiempo de Impresión				
Nº	Nombre	Divisiones	Horas	Minutos
1	Pulgar	Proximal	2	8
2		Medial	0	58
3		Distal	1	8
4	Índice	Proximal	1	55
5		Medial	1	40
6		Distal	0	43
7	Medio	Proximal	1	40
8		Medial	1	40
9		Distal	1	20
10	Anular	Proximal	1	53
11		Medial	1	40
12		Distal	1	20
13	Meñique	Proximal	1	29
14		Medial	1	10
15		Distal	0	58
16	Palma		7	12
17	Tapa Palma		1	35
18	Antebrazo		19	17
19	Acople Antebrazo – Bicep		15	43
20	Acople Bicep		9	11
Total			64	640
Total días, horas, minutos.			3 días, 6 horas, 40 minutos	

Realizado por: Estrada Omar, 2020

El tiempo total de impresión de la prótesis empleando la impresora Rostock Max V3 con el material PLA fue de 3 días, 6 horas y 40 minutos.

## 4.2 Costos de impresión

Para el diseño e impresión de la prótesis se requiere 394,33 dólares ya que se emplean los recursos y materiales de la siguiente tabla.

**Tabla 2-4.** Análisis prótesis

Recursos y materiales: humanos, equipos, financiamiento				
Costos				
Costos Directos e Indirectos del Proyecto.				
Nº	Detalle	Cantidad	Valor Unitario (\$)	Total (\$)
1	Impresión 3D	1	\$ 65.66	\$ 262.63
2	Consumo Energía eléctrica	9,75 kw	\$ 1.44	\$ 13.79
3	Rollo Hilo Nylon 9kg	1	\$ 2.50	\$ 2.50
4	Tornillo tripa de pato M3*12	20	\$ 0.12	\$ 2.40
5	Tornillo Estufa M3*15	20	\$ 0.16	\$ 3.20
6	Pasadores galvanizados 1/8"	16	\$ 0.25	\$ 4.00
7	Tiras Velcro	2	\$ 1.20	\$ 2.40
8	Tiras Elásticas	2	\$ 1.60	\$ 3.20
9	Transporte	12	\$ 6.00	\$ 72.00
10	Extras	6	\$ 7.00	\$ 42.00
Total (\$)				\$ 394.33

**Realizado por:** Estrada Omar, 2020

El costo es bajo en relación a las prótesis que se comercializan comúnmente en el mercado donde existen prótesis que superan el costo de 2500 dólares.

### 4.3 Cronograma

**Tabla 3-4.** Cronogram

N°	ACTIVIDADES																				
	MESES	Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre.			
	SEMANA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Levantamiento de información de protocolos empleados en la rehabilitación de extremidades superiores.																				
2	Toma de medidas antropométricas a partir del escaneo 3D del muñón.																				
3	Modelado 3D de un acople para la sujeción de la prótesis con el muñón.																				
4	Modelado de un muñón, brazo y mano de un prototipo para caso real de estudio, incursionando en herramientas informáticas CAD.																				
5	Mecanización por impresión 3d de modelos de prótesis robóticas.																				
6	Pruebas de uso, y comprobación de prótesis en trabajo.																				

Realizado por: Estrada Omar, 2020

## 5 CONCLUSIONES

El modelo tridimensional del muñón se obtuvo mediante un proceso de escaneado 3D en el cual se obtiene la geometría y las dimensiones de la parte del cuerpo mencionado, entre las medidas principales se determinó: longitud (8 cm) y perímetro (22 cm). El acople de la prótesis-muñón se diseñó en base a las medidas mencionadas. Cabe mencionar que las dimensiones de la mano y el antebrazo no se obtienen mediante el proceso de escaneado ya que debido al accidente que la paciente sufrió posee deformaciones en estas partes del cuerpo.

La prótesis ergonómica debe ajustarse a las características antropométricas de la paciente, es por ello que se registran las dimensiones del brazo y la mano izquierda ya que debido a la simetría del cuerpo humano las dimensiones obtenidas se replican en el diseño de la prótesis de brazo y mano derecha. Con una cinta métrica se determinó la dimensión de las falanges proximal, medial y distal; el largo y ancho de la palma de la mano; y las medidas del antebrazo. Con estas medidas se diseñó el modelo CAD.

Se realizó el modelo CAD en base a las medidas antropométricas obtenidas. Para facilitar el diseño se dividió a la prótesis en los siguientes componentes: falanges, palma de la mano, antebrazo y acople. El método de diseño CAD para cada componente se divide en: croquizado, operaciones y ensamble. Los componentes CAD diseñados poseen cavidades que alojan el sistema mecánico de la prótesis que es el encargado de darle movimiento, el cual, está compuesto por servomotores cuyo movimiento se comunica a los dedos de la mano mediante hilos conductores de nylon debido a su alta resistencia a la tracción, su costo moderado y la elasticidad que posee. Adicionalmente para el diseño CAD se realizó un análisis estático en el cual se determinó el factor de seguridad (mayor que uno) de los componentes y se concluyó que la prótesis es segura y resistente a los esfuerzos cortantes que se generan en la misma.

Para la impresión 3D de cada componente se empleó PLA debido a las características físicas y mecánicas que posee y que destacan sobre otro tipo de material como ABS, Filaflex y Laywood. El PLA tiene un peso ligero, alta resistencia mecánica, es un material biodegradable, no es tóxico y es de bajo costo. La secuencia (falanges, palma, antebrazo y acople) del proceso de impresión 3D es la misma que del modelado CAD, para el ensamble de los componentes se emplearon pines que facilitan el movimiento de los componentes de la prótesis. Una vez ensamblada la prótesis se realiza el acople en el muñón de la paciente para determinar que la prótesis cumpla con los parámetros de diseño

ergonómicos establecidos, la paciente mencionó que no siente ninguna molestia en la unión de la prótesis con el muñón, que el peso de la prótesis es ligero y en cuanto a las correas de sujeción sugiere apretar un poco más.

La prótesis de antebrazo y mano derecha es funcional porque posee 16 grados de libertad para los dedos y muñeca debido al sistema mecánico (hilo conductor y servos) que simulan el movimiento de una articulación normal; es estética ya que posee una textura lisa y el color piel que se asemeja a las características del ser humano; es ergonómica porque se ajusta a las dimensiones antropométricas de la paciente (longitud: 22 cm y perímetro muñón: 22 cm) y posee un peso ligero (481,3 gramos); es estable y se ajusta perfectamente al muñón; no es hermética; está construida a base de un material biodegradable (PLA) por lo que no es tóxica para la salud del paciente.

## **6 RECOMENDACIONES**

Previo al proceso de escaneo 3D se recomienda limpiar la superficie del polvo o cualquier impureza y posicionar a la persona ya sea de pie o sentada e indicarle que debe mantener la posición estática del muñón durante el proceso de escaneo a fin de minimizar los errores de forma en la geometría obtenida.

Se recomienda el uso del PLA si el objetivo del trabajo es obtener una prótesis de bajo costo, de peso ligero y con alta resistencia. Si se busca una textura que se asemeje más a la de la piel humana se recomienda el uso del material FilaFlex.

Se recomienda adiestrar sobre el uso de la prótesis ergonómica empleando el manual de usuario elaborado.

La prótesis no es hermética por lo que se recomienda mantenerla libre de líquidos y fluidos que puedan deteriorarla.

## BIBLIOGRAFÍA

**LMI TECHNOLOGIES.** *A Simple Guide To Understanding 3D Scanning Technologies*. Canada: LMI Technologies, 2003, pp 38.

**ALDAZ, K., & FARÍAS, F.** *Modelado de un implante ortopédico tipo prótesis para amputación parcial del pie con técnicas CAD-CAM*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2016. pp 25-30.

**ASOCIACIÓN AMERICANA DE ORTESIS Y PRÓTESIS.** *Prosthetics: Choosing What is Right for You*. Mexico: AMOP, 2018, [En Línea] <http://www.mobilitysaves.org/docs/prosthetic-devices.pdf>

**CAMBA, J., & CONTERO, M.** *Parametric CAD Modeling: An Analysis of Strategies for Design Reusability*. Houston: University of Houston, 2016. pp 59-65

**CEDILLO, U.** *Diseño y construcción de una prótesis ergonómica de pulgar*. Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi, 2017. pp. 15-97

**CREAFORM.** *An introduction to 3D scanning*. Saint-Georges: Creaform. 2016, pp 14.

**CUBILLOS, N., & MEDINA, O..** *Estudio piloto de medidas antropométricas de la mano y fuerzas de prensión, aplicables al diseño de herramientas manuales*. Chile: Universidad de Chile, 2010. pp 45-78

**EUROPEAN COMMISSION.** *Introduction to 3D Printing*. Union Europea: Erasmus, 2016. pp 126

**FERNANDEZ, J., & GOODMAN, M.** *Ergonomics in the workplace*. Nueva York: Universidad de Columbia., 2018. pp 32-36

**HALL, M., & ORZADA, B.** *Expressive Prostheses: Meaning and Significance*. Delaware: Bloomsbury Publishing Plc, 2017. pp 129-133.

**HERRERA, K.** *“Estado nutricional medido por antropometría y bioimpedancia en pacientes con tratamiento de hemodiálisis del hospital de especialidades de las ff.aa Quito”*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2013. pp 47-55

**HUAROTO, L.** *Semiología de antebrazo, muñeca y mano*. Cuba: SLD, 2019. pp 9-15

**JARA, N., & GOROSITO, M.** *“Prótesis Funcional de Miembro Superior controlada a partir de dispositivo Myo”*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, 2017. pp 57-62

**LEMA, H., & MARTINEZ, P.** *Diseño e implementación de un escáner 3d basado en visión artificial estéreo para el modelado y prototipado de prótesis ortopédicas pasivas por debajo del codo*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2017. pp 95-114.

**LESMES, D.** *Evaluación clínico-funcional del movimiento corporal humano*. Colombia: Ed. Médica Panamericana, 2017, pp 32-41

**LOBATO, V.** *Modelo Flexible de Movimiento de Torso, Brazo, Antebrazo y Muñeca*. Puebla: INAOE, 2016. pp 26-37

**MATIZ, J., & PINZÓN, J.** *Fabricación de prótesis transradial considerando la parametrización de sus componentes tomando como variables las medidas antropométricas del usuario*. Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2017, pp 3-29

**QUINGA, P.** *Modelado 3d personalizado y creación de prótesis externa del dedo índice izquierdo, para un funcionamiento biomecánico eficiente*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2018. pp 5-18

**TIERRA, A.** *Desarrollo de una prótesis mioeléctrica de brazo de bajo costo, para un niño de un año de edad con el defecto congénito de brida amniótica*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2017. pp 24-27

**ZHENG, J.** *CAD, 3D Modeling, Engineering Analysis, and Prototype Experimentation*. Bridgeport: University of Bridgeport, 2015. pp 67-73

## **ANEXOS**





**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**



**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS  
PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS**  
**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 22 / Mayo / 2020

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Omar David Estrada Apolo.
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Mecánica
<b>Carrera:</b> Ingeniería Industrial
<b>Título a optar:</b> Ingeniero Industrial
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b>